



El ambiente
es de todos

Minambiente



Directrices técnicas

PARA EL MANEJO DE MATERIALES
PLÁSTICOS RECUPERADOS DE RAEE
Y VEHÍCULOS DESINTEGRADOS

DIRECTRICES TÉCNICAS PARA EL MANEJO DE MATERIALES PLÁSTICOS RECUPERADOS DE RAEY Y VEHÍCULOS DESINTEGRADOS

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

Iván Duque Márquez

MINISTRO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Carlos Eduardo Correa Escaf

VICEMINISTRO DE POLÍTICAS Y NORMALIZACIÓN AMBIENTAL

Francisco Cruz Prada

DIRECTORA DE ASUNTOS AMBIENTALES SECTORIAL Y URBANA

Andrea Corzo Álvarez

COORDINADOR GRUPO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS, RESIDUOS PELIGROSOS Y UTO

Diego Escobar Ocampo

COORDINADOR PROYECTOS COP

José Álvaro Rodríguez Castañeda

Equipo Técnico

Edwin Camelo Martínez

INSTITUTO DE CAPACITACIÓN E INVESTIGACIÓN DEL PLÁSTICO Y DEL CAUCHO - ICIPC

Director

Iván Darío López

Equipo Técnico

Juan Fernando Campuzano Vallejo

Alexander Hernández Muñoz

Juan Carlos Ortiz Pimienta

Alejandro Serna Escobar

Eliana Moná Giraldo



INSTITUTO DE
CAPACITACIÓN
E INVESTIGACIÓN
DEL PLÁSTICO Y
DEL CAUCHO

Fotografías portada y contraportada:

Gaia Vitare S.A.S.

Diseño y diagramación:

•Puntoaparte

© Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022
©ICIPC, 2022

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y divulgación de material contenido en este documento para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización del titular de los derechos de autor, siempre que se cite claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este documento para fines comerciales.

No comercializable - Distribución gratuita



CATALOGACIÓN EN LA PUBLICACIÓN: Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental.
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Directrices técnicas para el manejo y gestión de materiales plásticos recuperados de RAEE y vehículos desintegrados / Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho – ICIPC: Campuzano Vallejo, Juan Fernando; Hernández Muñoz, Alexander; Ortiz Pimienta, Juan Carlos; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: Camelo Martínez, Edwin. — Bogotá D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; ICIPC: 2022.

113 p.: il.

ISBN: 978-958-5551-76-3

1. Materiales plásticos 2. Aprovechamiento y valorización 3. Reciclaje de materiales plásticos 4. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos 5. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales I. Tit. II. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

CDD: 342.02



CONTENIDO

1

PROPÓSITO

02



2

INTRODUCCIÓN

04



3

GLOSARIO

13



4

RECICLAJE MECÁNICO
DE MATERIALES
PLÁSTICOS DE
FUENTES RAE E Y UDV

23



5

IDENTIFICACIÓN DE
LOS MATERIALES
PLÁSTICOS

37



6

ESTANDARIZACIÓN
DE MATERIALES PARA
COMERCIALIZACIÓN

75



7

SECTORES DE INTERÉS
PARA MATERIALES
RECUPERADOS

83



8

ADITIVOS USADOS
EN LA INDUSTRIA
PLÁSTICA Y EL
RECICLAJE

88



9

REGLAMENTACIONES
PARA EL USO
DE MATERIALES
RECUPERADOS

104



10

REFERENCIAS

106





PROPÓSITO

El presente documento ha sido realizado con el fin de brindar herramientas prácticas y de consulta para la cadena de valor responsable de la gestión de los materiales plásticos, en especial para aquellos cuyas fuentes económicas provienen del reciclaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y de la gestión de los vehículos al final de su vida útil en las unidades de desintegración vehicular (UDV) o de las diferentes alternativas para el cierre de su ciclo.

Se muestran técnicas, equipos y tecnologías que apoyan la identificación de los materiales, su clasificación, separación y limpieza, con el fin de que las resinas plásticas gestionadas tengan mejores posibilidades de recuperación y valor de mercado. De esta manera, se apoya la sostenibilidad económica de los procesos de reciclaje en Colombia.

Otro de los propósitos se centra en educar a las empresas responsables de la gestión de estos materiales sobre el lenguaje técnico que implica la identificación, manipulación y transformación de plásticos. Este lenguaje es necesario para lograr mejores interacciones con los clientes, en especial los más exigentes; por lo cual, su conocimiento brindará mejores herramientas para la negociación y mejores posibilidades de cierre para los diferentes materiales.

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

RAEE

Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

UDV

Unidades de desintegración vehicular.

VFVU

Vehículos al final de su vida útil. En inglés: ELV: *End-of-life Vehicles*.

PP

Polipropileno.

PE

Polietileno.

PET

Polietileno tereftalato.

PEAD

Polietileno de alta densidad.

PEBD

Polietileno de baja densidad.

ABS

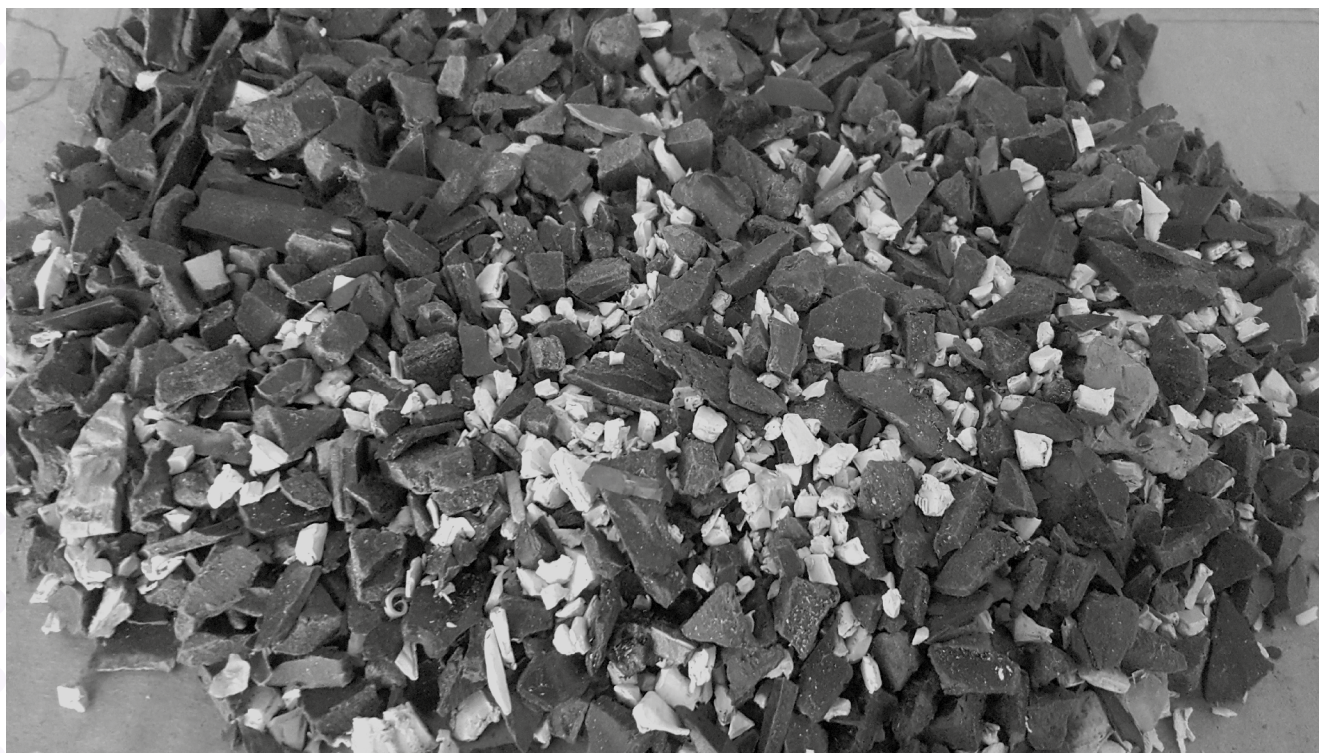
Acrilonitrilo butadieno estireno.

PS

Poliestireno.

PC

Policarbonato.





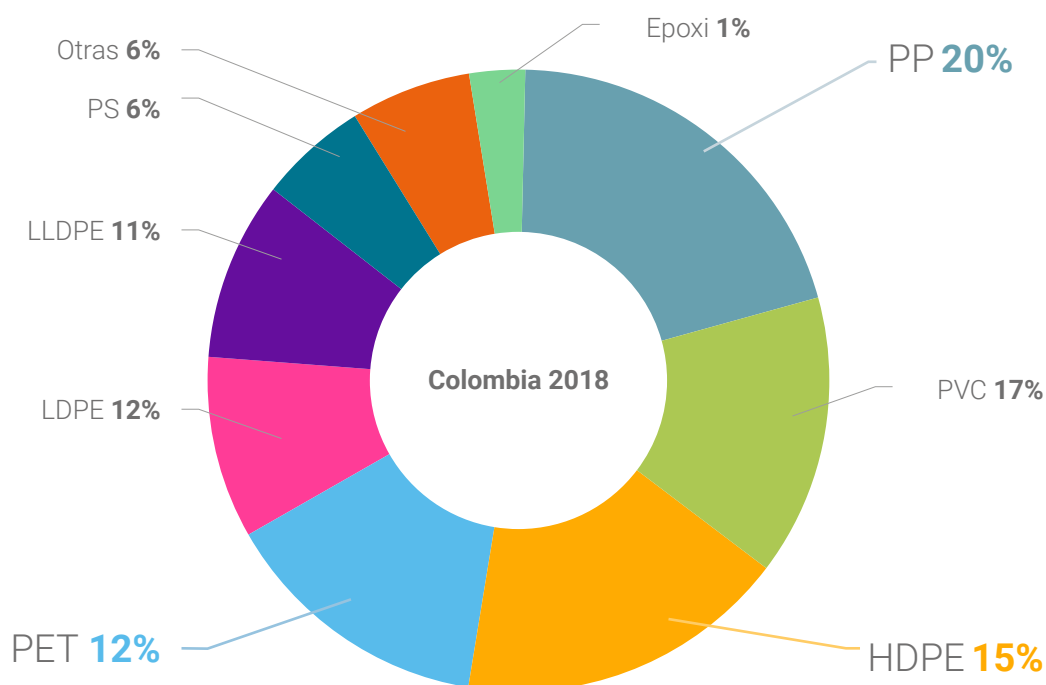
INTRODUCCIÓN

Los materiales plásticos han sido fundamentales para apoyar y promover los logros tecnológicos de la humanidad. Sus propiedades de bajo peso, larga vida y gran resistencia han permitido reemplazar materiales como metales, cerámicas, vidrio, papel y cartón, con lo cual lograron soluciones eficientes a nivel técnico, económico y ambiental.

Su gran penetración e impacto, en prácticamente todos los aspectos de la vida cotidiana, ha favorecido el desarrollo de una gran cantidad de materiales poliméricos diseñados para solucionar problemas técnicos en infinidad de aplicaciones, lo que a su vez plantea grandes retos a afrontar en cuanto a su adecuado uso y disposición.

Según el reporte anual realizado por Acoplásticos (2020), en 2018 se consumieron 1.280.000 toneladas de plásticos, de los cuales los más relevantes fueron el polipropileno (PP) con 20 %, seguido por el policloruro de vinilo (PVC) con 17 % y el polietileno tereftalato (PET) con 12 %, los polietilenos en conjunto alcanzan un total del 40 % (ver figura 1).

Figura 1.
Distribución de consumo de plásticos por tipo en Colombia durante el 2018.



Fuente: Acoplásticos (2020, p. 91).

Dentro de la categoría “Otras” se encuentran: poliacetales (POM), polimetilmetacrilato (PMMA), etileno vinil acetato (EVA), estireno acrilonitrilo (SAN), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonatos (PC), poliamida 6 (PA6), fenólicas, poliuretanos (PU), polieteres, polioles, urea formaldehído para moldeo (UF), ácido poliláctico (PLA), entre otras.

La tabla 1 contiene la estructura sectorial de la demanda entre el 2016 y el 2018, en términos del tonelaje de resinas consumido por la industria local fabricante de productos intermedios y finales de plástico.

Tabla 1.

Principales sectores consumidores de materias plásticas en Colombia entre el 2016 y el 2018.

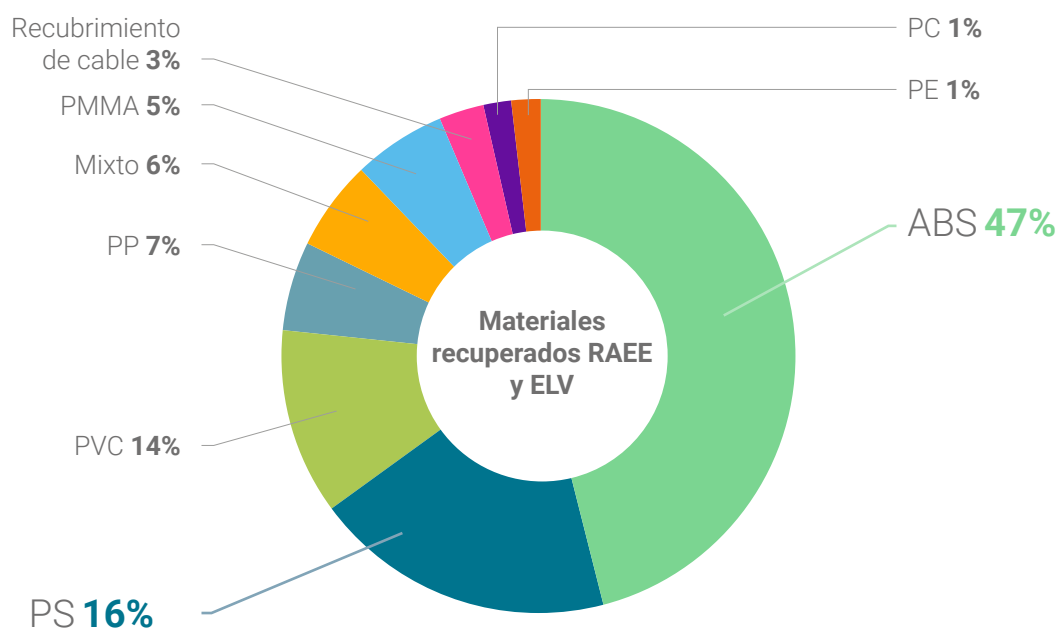
Sector	Descripción	%Consumido
1. Empaques y envases.	Productos alimenticios, productos de higiene y aseo, productos industriales y lubricantes.	54 %
2. Construcción.	Tubería, accesorios, pisos, tejas, perfiles, cables y bañeras.	22 %
3. Agricultura	Película para invernaderos, acolchados, telas sombra, mangueras y tubos.	7 %
4. Institucional/ consumidor.	Calzado, cepillos, escobas, artículos de mesa y cocina, colchones y muebles.	6 %
5. Otros.	Láminas, partes industriales, industria automotriz, juguetes, deportes y varios.	11 %

Fuente: Acoplásticos (2020).

El ICIPC realizó un diagnóstico a algunos de los principales gestores de RAEE y UDV (también conocidos como *End-of-life-Vehicles* –ELV) en el año 2019, e identificó que en el país se recuperan más de 2.900 toneladas de materiales plásticos al año (Campuzano y Hernández, 2019), lo que representa una recuperación aproximada del 2 % del material consumido anualmente para la categoría “Otros” de la tabla 1, en la cual se incluyen los vehículos y los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE). No obstante, dentro del diagnóstico realizado, varias de las empresas no cuentan con registros detallados del procesamiento de plásticos, ni se cubrió el 100 % de los gestores, por lo que esta información es susceptible de ser actualizada posteriormente. En especial con las herramientas que pondrá a disposición el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) para que todos los gestores acreditados hagan un adecuado balance de masa y reporten la información de manera digital en la plataforma Smart RAEE, herramienta que se estima esté disponible y funcional en 2021.

De acuerdo con la información reportada por los gestores (Campuzano y Hernández, 2019) sobre el aprovechamiento de los materiales plásticos, se puede observar en la figura 2 la distribución de materiales por tipo.

Figura 2.
Distribución de
materiales por tipo.



Fuente: ICIPC (2019).

2.1 PLÁSTICOS EN RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

Los AEE son todos aquellos dispositivos que para funcionar necesitan alimentación mediante corriente eléctrica o campos electromagnéticos. Estos aparatos suelen estar compuestos por una amplia variedad de materiales: plásticos, metales, madera e incluso materiales valiosos como el oro, coltán, platino, cobre, etc., los cuales son susceptibles de ser recuperados mediante reciclaje al final de su vida útil (Kaya, 2018; De Meester *et al.*, 2018).

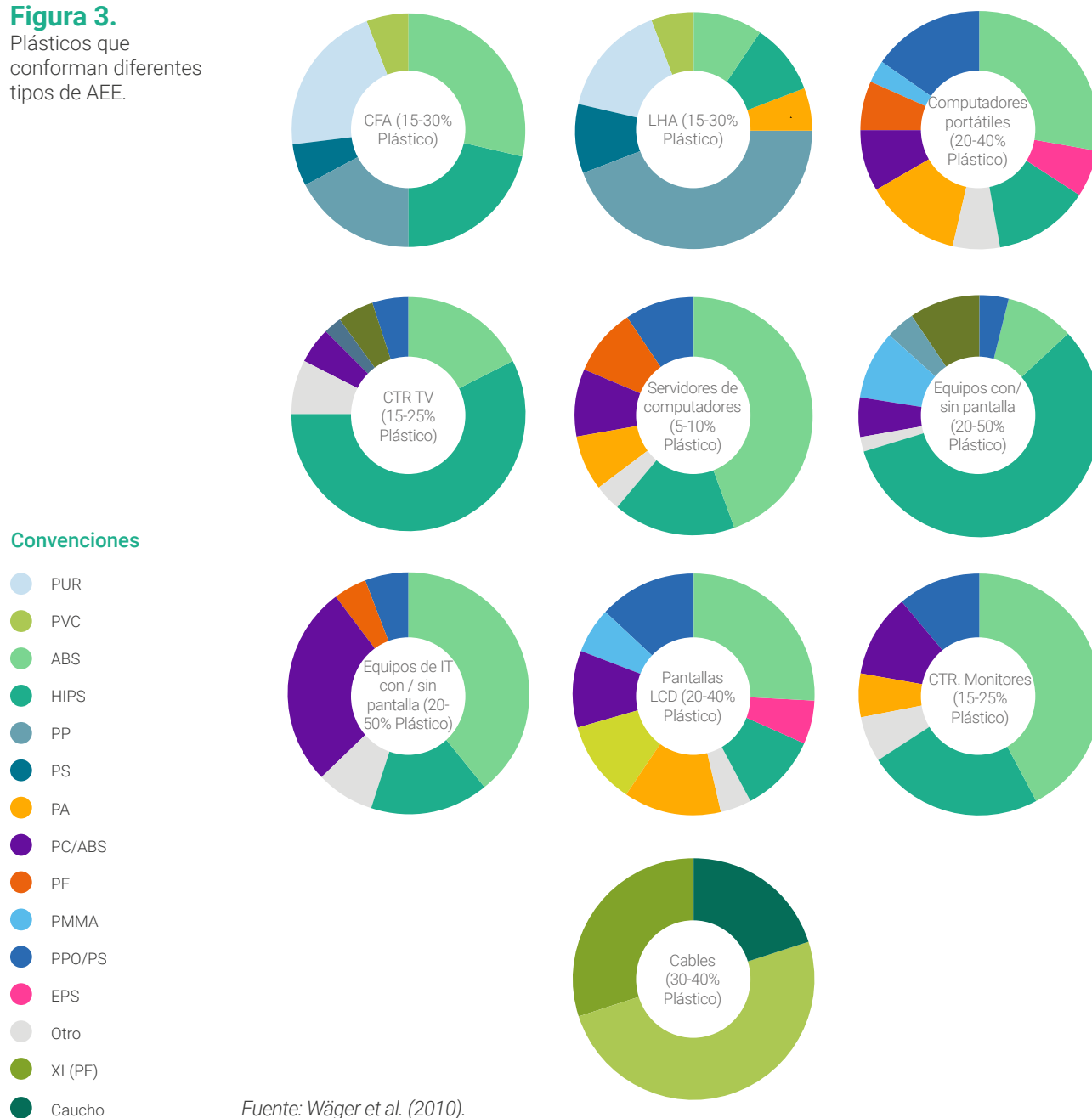
La gran cantidad de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos que se generan a nivel mundial y su complejidad en el manejo, han creado nuevas líneas industriales y ha dado lugar al término residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) o WEEE, por sus siglas en inglés (*waste electrical and electronic equipment*). Se entiende por residuos o desechos electrónicos “todos aquellos elementos de AEE o de sus componentes, que hayan sido desechados por sus propietarios como desperdicios sin ánimo de reutilizarlos” (Dewulf *et al.*, 2019; Balde *et al.* 2017). Según la Directiva sobre RAEE 2012/19/EU la clasificación de los residuos electrónicos abarca seis categorías principales de residuos:

- Aparatos de intercambio de temperatura, como refrigeradores, congeladores, aparatos de aire acondicionado y bombas de calor.
- Pantallas y monitores.
- Lámparas, incluyendo fluorescentes, y LED.
- Grandes aparatos como lavadoras, secadoras, cocinas eléctricas, impresoras grandes y paneles fotovoltaicos.
- Pequeños aparatos como aspiradoras, hornos de microondas, tostadoras, máquinas de afeitar, básculas, calculadoras, radios, videocámaras, juguetes eléctricos y electrónicos, herramientas eléctricas y electrónicas, dispositivos médicos, entre otros.
- Aparatos de informática y telecomunicaciones pequeños. Se incluyen en esta categoría celulares, GPS, computadoras personales, impresoras pequeñas y teléfonos.

Estas categorías fueron seleccionadas según las cantidades de residuos y valores económicos de cada grupo de AEE, así como su impacto sobre el medio ambiente y la salud cuando no son adecuadamente reciclados.

Los principales plásticos encontrados en diferentes tipos de RAEE se presentan en la figura 3.

Figura 3.
Plásticos que conforman diferentes tipos de AEE.



Fuente: Wäger et al. (2010).

En Colombia, según el Anexo 1 de la Resolución 076 de 2019 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se habla de 3 categorías y 33 subcategorías de AEE, como se muestra a continuación:

1. Aparatos electrodomésticos

- Cocinas y hornos.
- Enseres de audio y video.
- Enseres mayores de hogar.
- Enseres menores de calentamiento.
- Enseres menores de cocina.
- Enseres menores de hogar.
- Enseres menores personales.
- Equipos de acondicionamiento de aire.
- Herramientas para el hogar.
- Refrigeración doméstica y comercial.

2. Electrónica y equipos de telecomunicaciones

- Antenas para telecomunicaciones.
- Circuitos electrónicos.
- Componentes electrónicos.
- Computadores y equipos para tratamiento de datos.
- Equipos electromédicos.
- Electrónica de consumo.
- Equipos de electrónica de potencia.
- Equipos de instrumentación y control.
- Equipos de telecomunicaciones.
- Periféricos, partes y tarjetas para computadores e impresoras.

3. Maquinaria y equipo eléctrico

- Cables y conductores.
- Equipo industrial.

- Equipos de control y protección.
- Equipos de iluminación.
- Equipos eléctricos e instalaciones para vehículos.
- Grupos electrógenos.
- Máquinas y aparatos de oficina.
- Motores y generadores.
- Otros aparatos y sistemas.
- Piezas eléctricas.
- Pilas y acumuladores.
- Refrigeración y equipos de acondicionamiento de aire industriales.
- Transformadores.

2.2 PLÁSTICOS EN VEHÍCULOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL GESTIONADOS EN LAS UNIDADES DE DESINTEGRACIÓN VEHICULAR

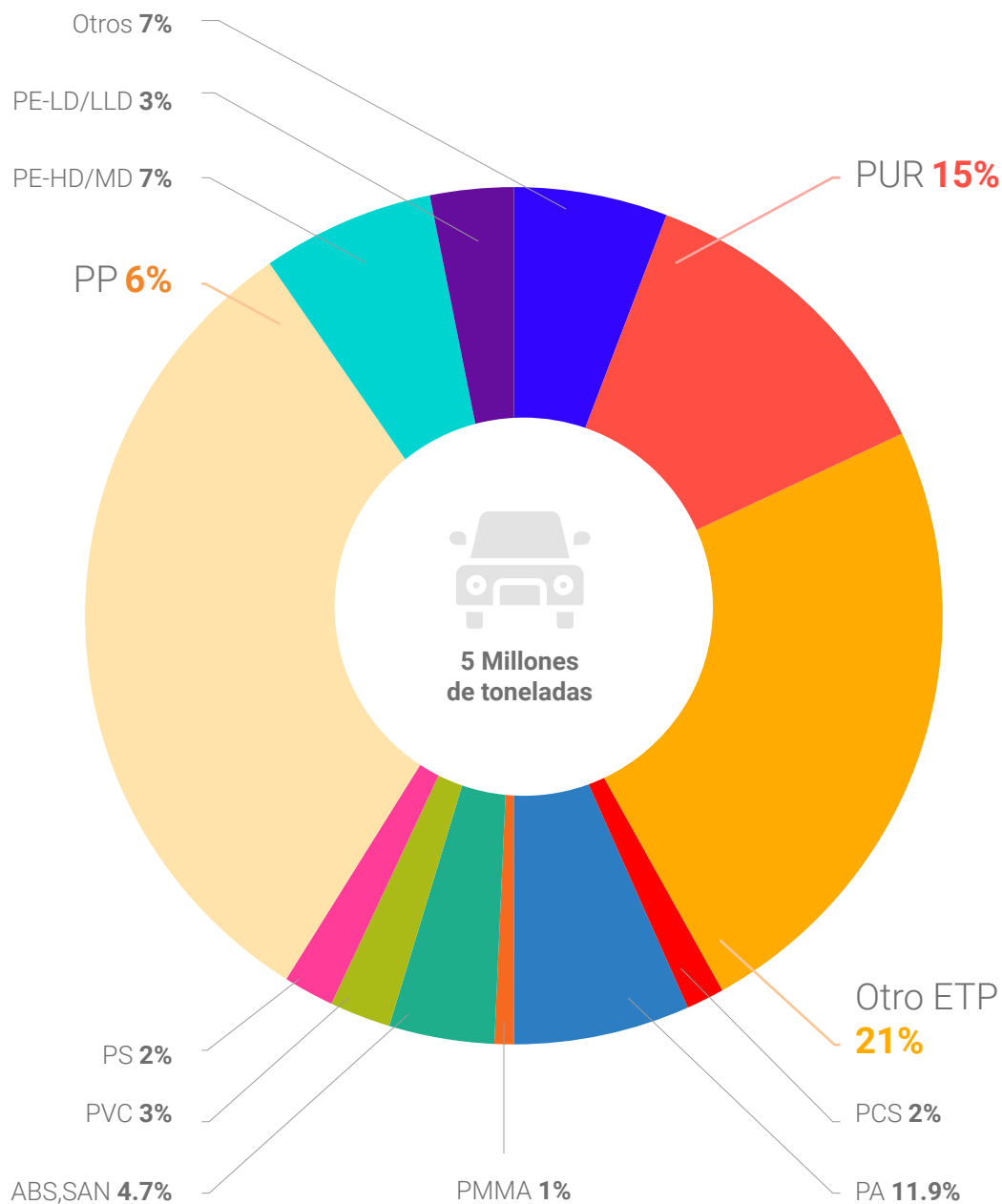
El sector automotriz (vehículos pesados, livianos, transporte masivo y motocicletas) ha incrementado de manera notable el uso de materiales plásticos en los últimos años, motivados por razones de eficiencia y desempeño, por lo cual se estima que, en promedio para un vehículo compacto, los componentes plásticos representen entre 14 % y 18 % del peso total del vehículo.

A estos materiales es necesario tratarlos una vez los vehículos cumplen su vida útil y son desmantelados, labor que es realizada por las UDV en Colombia. Estas empresas son vigiladas por los entes gubernamentales en cuanto a los vehículos que gestionan, y guardan estrictos controles del balance de masa entre lo que ingresa y lo que sale de la planta.

Algunos de los principales plásticos encontrados en los vehículos se pueden observar en la figura 4.

Figura 4.

Plásticos que conforman un vehículo promedio.



Fuente: ICIPC (2021).

Como puede apreciarse, hay una gran variedad de materiales y combinaciones que se integran en los vehículos, los cuales representan una mayor o menor complejidad en su disposición, así como, dependiendo de ciertas características, tendrán diferentes potenciales de valorización.

3



GLOSARIO

3.1

MATERIALES PLÁSTICOS

Los plásticos hacen parte de un grupo de compuestos orgánicos denominados, de manera general, como polímeros. Están conformados por largas cadenas denominadas macromoléculas, las cuales contienen en su estructura carbono e hidrógeno principalmente.

Los polímeros se obtienen mediante reacciones químicas entre diferentes materias primas, las cuales pueden ser de origen sintético o natural, y, dependiendo de la estructura y forma en la que el carbono se une con hidrógeno, oxígeno o nitrógeno, cambian radicalmente las propiedades físicas y desempeño del material.

Los materiales plásticos (polímeros) se dividen en dos grandes familias:

- **Termoplásticos:** es decir, materiales que se ablandan al ser calentados y se endurecen nuevamente al enfriarse.
- **Termoestables:** que adoptan una forma permanente al aplicarles calor y presión y no se ablandan nuevamente en presencia de la temperatura.

La principal fuente de materias primas para la producción de plásticos, además del gas natural, es el petróleo. Cabe señalar que solo el 5 % del petróleo extraído es utilizado para la fabricación de materiales plásticos, lo que representa, en comparativa, una mínima cantidad de recursos no renovables utilizados.

Las propiedades de los materiales plásticos han permitido desarrollar acciones cotidianas de manera eficiente, al maximizar el uso de recursos y minimizar la pérdida, por ejemplo, de alimentos y medicamentos, con menores impactos al ambiente que otros materiales. Sin embargo, la combinación de un uso no racional, una disposición inadecuada y debilidades en la gestión de los materiales han tenido efectos negativos para el medio ambiente.

Dadas estas realidades y el compromiso de Colombia con una economía circular, lugar donde convergen actualmente todos los sistemas regulatorios a través de mecanismos conocidos como de responsabilidad extendida del productor (REP), se viene generando un ambiente favorable para un mejor cierre de ciclo de los materiales plásticos. Para poder llegar a este objetivo es necesario cerrar las brechas de conocimiento existentes sobre la cadena de valor de estos materiales; por lo cual la presente guía servirá de hoja de ruta, elemento de formación y medio de consulta para este propósito.

A continuación, se encuentra la descripción de las resinas más utilizadas en los sectores RAEE y UDV, también sus características y aplicaciones.



POLIPROPILENO

El polipropileno es un hidrocarburo (base carbono) del tipo semicristalino, el cual pertenece a la familia de las poliolefinas y es producido a través de la polimerización del propileno (el cual es un gas resultante como sub-producto de la industria petroquímica). Su estructura molecular consta de un grupo metilo (CH_3) unido a un grupo vinilo ($\text{CH}=\text{CH}_2$). El polipropileno también puede ser copolimerizado con etileno para formar los copolímeros *random* (mejor transparencia y brillo) y los copolímeros de impacto (buena resistencia al impacto a temperatura ambiente y bajas temperaturas).

Entre las aplicaciones comunes del PP se encuentran películas para empaques flexibles, confitería, laminaciones, bolsas en general, rafia, cuerda industrial, fibra textil, zuncho, muebles plásticos, utensilios domésticos, geotextiles, mallas plásticas, carcasas de baterías, vasos desechables, vasos plásticos, tarrinas, empaques para detergentes, tubería, botellas, botellones, juguetería, etc.



POLIETILENO

Al igual que el polipropileno, el polietileno es un hidrocarburo semicristalino que hace parte de la familia de las poliolefinas. Se produce a partir de la polimerización del etileno (derivado del petróleo o gas natural). Existen variedades de polietileno según las condiciones del proceso de fabricación,

las más conocidas son el polietileno de alta densidad PEAD o HDPE y el polietileno de baja densidad PEBD o LDPE. De este último se producen dos tipos el PEBD convencional y el PEBD lineal o LLDPE.

Entre las aplicaciones comunes del PEAD se encuentran tuberías, embalajes y láminas industriales, tanques, bidones, canastas o cubetas para leche, cerveza, refrescos, transporte de frutas; botellas, recubrimiento de cables, contenedores para transporte, vajillas plásticas, letrinas, cuñetes para pintura, bañeras, cerramientos, juguetes, barreras viales y conos de señalización.

Entre las aplicaciones comunes del PEBD se encuentran películas para envolver productos, películas para uso agrícola y de invernadero, láminas adhesivas, botellas y recipientes varios, tuberías de irrigación y mangueras de conducción de agua, bolsas y sacos, tapas, juguetes, revestimientos y contenedores flexibles.



ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS)

El ABS es un polímero amorfo procedente de la polimerización por emulsión de acrilonitrilo y estireno en presencia de polibutadieno. Las propiedades más importantes del ABS son la resistencia a los impactos y su dureza.

Entre las aplicaciones más comunes del ABS se encuentran juguetes, bienes de consumo, teléfonos, cascos de seguridad; en la industria automotriz: paneles interiores para puertas, pilares, tapicería de asientos, rejillas, tableros de mando y carcasas para espejos; también se encuentra en carcasas de electrodomésticos de cocina, carcasas de aspiradoras, paneles de control o productos de línea blanca y empaques para el sector cosmético.



POLIESTIRENO

El poliestireno es el polímero amorfo resultante de la síntesis orgánica entre el etileno y el benceno (hidrocarburos derivados del petróleo) para formar el monómero del estireno que se polimeriza para formar el poliestireno. Los tipos principales de PS son el poliestireno de uso general (GPPS) y el poliestireno de alto impacto (HIPS).

Entre las aplicaciones industriales más comunes del PS se encuentran elementos para equipos eléctricos y electrodomésticos, carcasas, gabinetes interiores, contrapuestas de neveras, estuches para casetes de audio y video, aplicaciones en la industria farmacéutica y accesorios médicos, juguetería y recipientes de cosméticos; en la industria de la construcción en elementos como encofrados, concretos aligerados, difusores de luz, divisiones de baño, cielorrasos y rejillas arquitectónicas; igualmente, en la industria automotriz, en artículos escolares y de oficina, en elementos decorativos para el hogar, en publicidad y promocionales.



POLICLORURO DE VINILO (PVC)

El PVC es un polímero amorfo compuesto por tres elementos naturales: carbono e hidrógeno (en forma de etileno) y cloro, al combinar estos tres elementos se obtiene el monómero cloruro de vinilo, que a su vez se polimeriza mediante procesos de suspensión, emulsión o masa, para obtener como resultado el PVC.

En una etapa siguiente, la resina de PVC se mezcla con diversos aditivos para obtener compuestos que incorporan así todas las propiedades requeridas para su procesamiento y uso. Dependiendo de los aditivos seleccionados, los productos de PVC pueden ser totalmente rígidos o flexibles, transparentes u opacos y adquirir cualquier forma, textura o color.

Entre las aplicaciones más comunes del PVC se encuentran tuberías y accesorios para sistemas de suministro de agua potable, riego y alcantarillado como ductos, canaletas de drenaje y bajantes; en componentes para la construcción como perfiles y paneles para revestimientos exteriores, ventanas, puertas, cielorrasos y barandas, tejas y tabletas para pisos; en partes de electrodomésticos y computadores; en vallas publicitarias, tarjetas bancarias y otros elementos de artes gráficas; en envases de alimentos, detergentes y lubricantes; en empaques tipo blíster, membranas para impermeabilización de suelos o techos, recubrimientos aislantes para cables conductores, etc.



POLICARBONATO

El policarbonato es un polímero amorfo formado a partir del Bisfenol-A unido con grupos de carbonato. El policarbonato es un termoplástico común, tanto en los hogares como en la industria o en la arquitectura por sus principales cualidades: gran rigidez, transparencia óptica, estabilidad dimensional, baja propagación a la llama, resistencia a los impactos y al calor, lo cual lo hace apto para trabajar entre los -20°C y los 140°C .

El policarbonato se usa en una gran variedad de campos y aplicaciones. Electricidad y electrónica: teléfonos celulares, computadoras, máquinas de fax, cajas de fusibles, interruptores de seguridad y enchufes. Medios ópticos: discos compactos (CD), DVD y CD-Rom. Automotor: cubiertas del espejo, luces traseras, direccionales, luces de niebla y faros. Bienes de consumo: garrafrones para agua mineral, calderas eléctricas, juguetes, refrigeradores, licuadoras, secadores de cabello. Tiempo libre y seguridad: cascos de protección personal ligeros, gafas de sol, visores resistentes, cubiertas de binoculares y brújulas, lentes de uso común y luces de barcos. Botellas y empackado: biberones, botellas de agua y leche, recipientes para microondas. Médico y cuidado de la salud: incubadoras plásticas, dializadores de riñón, conexiones de tubos, unidades de infusión, tubo respirador y utensilios esterilizables. Vidriado y lámina: cristales de seguridad para los juegos de jockey y bancos, escudos de policías, cubiertas y cerramientos verticales en naves industriales y pabellones, lámina de esmaltado para invernaderos y estadios.

3.2 EL RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS

El reciclaje hace parte del proceso de gestión del cierre de ciclo de los materiales. De manera particular, el ciclo de vida de un material plástico inicia con la extracción de las materias primas y sus componentes, seguido por los procesos de producción/transformación, para luego desempeñar su propósito, bien sea como material de empaque, artículo electrónico o parte en un vehículo.

Figura 5.
Ciclo de vida
de un material
plástico.



Fuente: ICIPC (2021).

El reciclaje es el proceso mediante el cual se aprovechan y transforman los residuos recuperados y se devuelve a los materiales su potencial de reincorporación como materia prima para la fabricación de nuevos productos (Cucchiella *et al.*, 2015; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Al igual que el metal y el vidrio, los plásticos son, en su mayoría, reciclables. Sin embargo, hay numerosos obstáculos técnicos y económicos que afrontar. Por ejemplo, las incompatibilidades entre los diferentes tipos de polímeros representan un gran reto en el proceso, ya que una pequeña cantidad de material incompatible puede dañar un lote completo de material reprocesado (Ministerio de Ambiente, 2004).

El reciclaje de plásticos puede llevarse a cabo mediante diversas técnicas, dentro de las cuales se encuentran los procesos mecánicos, químicos o energéticos, como se detalla a continuación. La elección de la mejor alternativa dependerá de factores económicos, técnicos y logísticos.



RECICLAJE MECÁNICO

Casi todos los plásticos pueden reciclarse con éxito para segundas aplicaciones. Una vez limpios y triturados, los materiales pueden ser usados en dicha forma o pueden ser granulados, para poder ser usados en procesos posteriores de transformación, acorde a las distintas aplicaciones. El reciclaje mecánico se divide en primario y secundario según la fuente del residuo (Al-Salem, 2009).

Reciclaje primario: reciclaje mecánico de desperdicios posindustriales y poscomerciales

Este tiene lugar dentro del mismo proceso en el que se genera el residuo o dentro de la cadena logística de distribución, sin llegar a la disposición final en relleno sanitario. Hace referencia al reciclaje industrial y se lleva a cabo normalmente mediante la molienda y densificación, según se requiera. Posteriormente, se reincorpora el material plástico recuperado al proceso de fabricación.

Reciclaje secundario: reciclaje mecánico de desperdicios posconsumidor

Se denomina así al proceso de recuperar, mediante reciclaje mecánico, los residuos de productos hechos con materiales plásticos, una vez que éstos han terminado su vida útil. Para este tipo de reciclaje se requiere de una logística inversa, robusta y capaz de acopiar dichos materiales y llevarlos a las plantas de tratamiento, lo cual es el principal reto y costo asociado para este tipo de reciclaje.



RECICLAJE QUÍMICO O RECICLAJE TERCIARIO

No siempre los residuos plásticos recuperados pueden ser sometidos a reciclaje primario o secundario, ya sea por presentar una alta contaminación con sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, por tener un alto grado de deterioro

en sus propiedades mecánicas, o porque su composición (por ejemplo, productos multimaterial o multicapa de diferentes materiales incompatibles entre sí) hace inviable técnica o económicamente su recuperación.

El reciclaje químico (Al-Salem, 2009) es el tratamiento de residuos plásticos mediante procesos fisicoquímicos, en los cuales las moléculas de los plásticos son craqueadas (rotas), con el fin de obtener de ellos monómeros o productos con algún valor para la industria petroquímica.

Entre los procesos de reciclaje químico se encuentran la pirólisis, hidrogenación, gasificación, extrusión degradativa, quimiolisis y el metanólisis. El éxito de la mayoría de las tecnologías de reciclaje químico depende de la disponibilidad constante de grandes cantidades de desechos plásticos, ya que la economía de escala es determinante para que sean competitivas.

Otras variantes del reciclaje químico son las técnicas de disolución de los polímeros en solventes específicos afines a estos (Gesellschaft, 2017). De esta manera, es posible filtrar los elementos contaminantes, tales como pigmentos, fibras, adhesivos e incluso otros polímeros, para luego secar el polímero purificado y obtener un material con características cercanas al original.



RECICLAJE ENERGÉTICO O RECICLAJE CUATERNARIO

Los residuos plásticos que no son susceptibles de aprovechamiento a través de reciclaje mecánico o químico pueden ser utilizados como combustible debido a su alto valor energético (cercano al carbón) (Al-Salem, 2009).

La mayoría de los plásticos no son otra cosa que hidrocarburos, derivados del petróleo o del gas natural, por lo que la recuperación de energía puede ser una forma eficaz, en función de los costos de recuperar un valor intrínseco de los residuos plásticos (Wasilewski, 2013). La tabla 2 muestra la comparación del poder calorífico y la composición elemental de algunos plásticos comparada con el carbón.

Tabla 2.
Poder calorífico de diferentes tipos de materiales comparados con el carbón.

Tipo de plástico	Contenido promedio %	Composición elemental, % material seco						Contenido de cenizas, % material seco	Poder calorífico MJ/KG
		C	H	O	N	S	CL		
PE	25	81,89	12,37	0,00	0,46	1,92	0,97		41,80
PP	15	68,89	9,13	14,61	1,82	1,29	1,24	2,93	30,90
PVC	40	37,56	4,94	44,00	0,42	0,71	4,43	7,94	13,69
PA	5	65,39	10,38	10,54	8,49	1,41	0,43	3,36	36,76
PS	5	88,48	8,36	0,00	0,50	1,12	0,16	1,38	38,97
PET	10	56,40	5,68	33,10	0,44	0,80	1,43	2,15	21,81
Promedio	100	59,18	7,94	23,68	1,05	1,16	2,37	4,66	26,41
Carbón Bituminoso*	100	66,90	4,14	9,94	1,17	0,80	0,33	16,70	26,00

*Base de datos de las propiedades del carbón IChPC (Mieszlo II).
Fuente: Wasilewski, 2013.

4

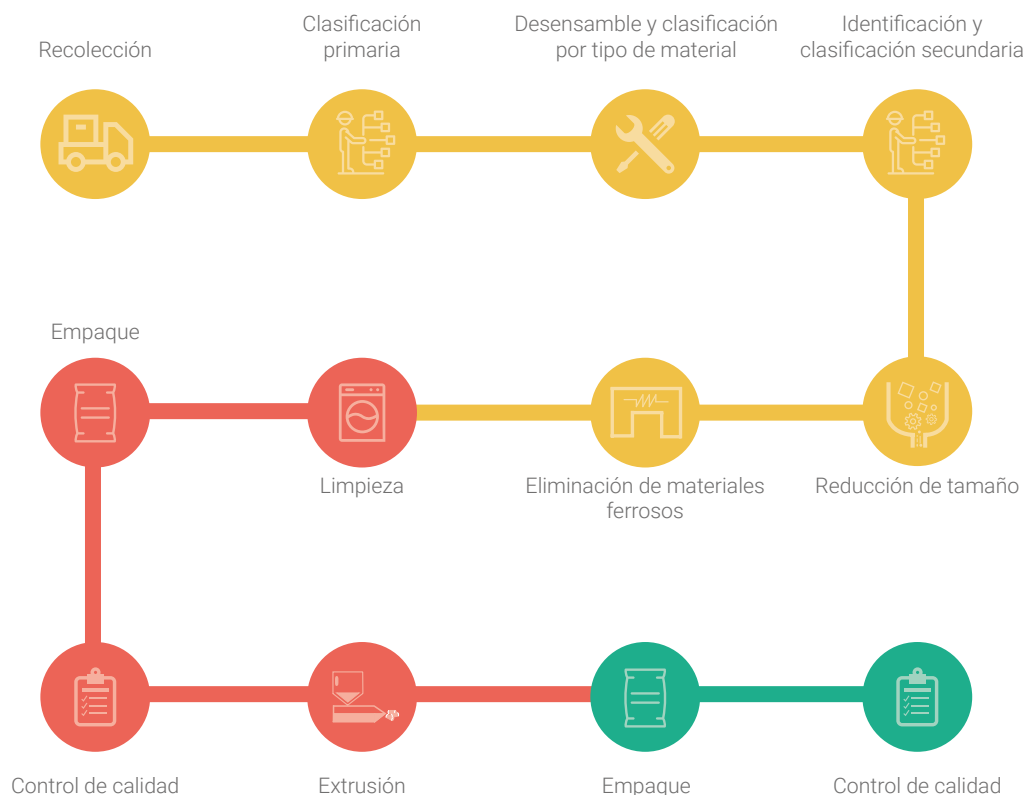


RECICLAJE MECÁNICO
DE MATERIALES PLÁSTICOS
DE FUENTES RAEE Y UDV

El reciclaje mecánico comprende una serie de pasos o etapas que deben surtir-se para lograr un producto comercializable de valor. En la figura 6 se presentan las diferentes etapas que a modo general contempla el reciclaje mecánico.

Figura 6.

Etapas del reciclaje mecánico.



Fuente: ICIPC (2021).

4.1 RECOLECCIÓN

El proceso de recolección es realizado de acuerdo con las diferentes modalidades y programas que tengan las empresas y asociaciones enfocadas al reciclaje y recuperación de materiales.

La estrategia de recolección selectiva de los residuos posconsumo es una de las más importantes para aumentar el potencial de recuperación y aprovechamiento de los materiales de diferentes tipos. Los programas y gestores enfocados a la recolección de RAEE y UDV usan esta estrategia.

En Colombia, las bases de estas estrategias se soportan en la Ley 1672 de 2013, la cual entrega la responsabilidad de la gestión de los aparatos eléctricos y electrónicos a los fabricantes, quienes hacen alianzas con diversos gestores para dar una adecuada disposición a los mismos.

Cabe señalar que los plásticos pueden separarse de los materiales no plásticos antes de su recolección, o pueden separarse de una corriente mixta de residuos después de su recolección.

4.2 CLASIFICACIÓN PRIMARIA O POR TIPO DE ARTÍCULO

En esta etapa, los diferentes residuos que llegan a los gestores son separados por familias y subfamilias, según el tipo de materiales que los conforman, las cantidades y su potencial de aprovechamiento, entre otros criterios, de modo que se facilite su gestión.

En el caso de los AEE y, por consiguiente, los RAEE, esta clasificación se hace de acuerdo con las categorías y subcategorías mencionadas en el numeral 2.1 según la Resolución 076 del 2019 e igualmente para los vehículos en el numeral 2.2.

4.3 DESENSAMBLE Y CLASIFICACIÓN POR TIPO DE MATERIAL

En esta etapa, los diferentes artículos, equipos, vehículos, entre otros, son sometidos a procesos de desensamble manual o automáticos, en los cuales se busca separar, en lo posible, todos los materiales que conforman ensambles o piezas complejas multimateriales y reducir su tamaño para facilitar el manejo.

Adicionalmente, en esta etapa, se realiza una segregación de los diferentes materiales según la familia: materiales ferrosos, materiales no ferrosos, líquidos, gases, vidrio, madera y plásticos, los cuales son posteriormente

enviados a procesos separados de recuperación o disposición. En esta etapa, es posible que queden algunos contaminantes y mezclas de materiales difíciles de separar, los cuales deben ser identificados y separados en etapas posteriores de modo que se obtengan materiales limpios y de buena calidad.

En algunos casos, incluso se realiza una clasificación básica de los materiales plásticos por tipo de familia plástica (ABS, PP, PS, entre otros). Esta separación se hace generalmente con base en la marcación de las piezas, como se mencionará posteriormente, o con base en la experiencia y conocimiento de los materiales que conforman un determinado tipo de artículo o vehículo, como se observa en las figuras 3 y 4 para los materiales comúnmente encontrados en diferentes residuos RAEE y UDV (Bill, 2019; Vermeulen *et al*, 2019).

En este proceso, cuanta más información tenga una empresa de reciclaje sobre sus fuentes y material de entrada, podrá elaborar procesos de clasificación de una manera más eficiente.

En la tabla 3 se encuentran las principales ventajas y desventajas que posee este método de identificación y separación manual por tipo de material.

Tabla 3.
Ventajas y desventajas de la clasificación manual.

Ventajas	Desventajas
• No requiere inversiones elevadas en equipos. • Con entrenamiento se puede lograr un excelente grado de pureza.	✗ Intensivo en mano de obra. ✗ Se requieren conocimientos básicos en plásticos del personal para una adecuada separación. ✗ Alta posibilidad de contaminación cruzada en los materiales separados. ✗ Baja productividad por persona. ✗ Requiere piezas correctamente marcadas o de fácil identificación para una adecuada separación. ✗ Poco eficiente en la separación de material triturado o molido.

Fuente: ICIPC (2020).

4.4 IDENTIFICACIÓN DE MATERIALES Y CLASIFICACIÓN SECUNDARIA

En algunos casos se suele realizar una clasificación adicional por color del material, de esta manera se mejora el valor comercial del producto obtenido.

Las diferentes técnicas de identificación y separación de materiales plásticos serán abordadas con mayor profundidad en el numeral 5 de la presente guía.

4.5 REDUCCIÓN DE TAMAÑO

Una vez segregados los diferentes tipos de materiales, se requiere un proceso de trituración del material separado; esto con el objetivo de reducir el tamaño de los residuos para facilitar su manejo y procesamiento, así se obtiene un material molido (conocido como escamas) tal como se observa en la figura 7.

Figura 7.

Plástico de fuentes RAEE y UDV después del triturado (escamas).



Fuente: ICIPC (2021).

Para el molido de los materiales existen dos tipos de principios de molienda, una por corte y otra por impacto. La molienda por corte se utiliza para piezas delgadas de tamaño medio y la molienda por impacto se usa para piezas de gran tamaño y espesores gruesos. Estos dos tipos de molienda son adecuados en RAEE y UDV, teniendo en cuenta los tamaños. Para piezas grandes se pueden utilizar molinos de rodillos de corte. Se recomienda que el material que sale de este molino pase posteriormente por un molino de corte más fino como uno de cuchilla. Este último de cuchillas también se recomienda para piezas de menor tamaño.

Luego del corte y dependiendo de la naturaleza del material, se obtiene un material granulado acompañado de partículas muy pequeñas y de finos. Este material debe ser retirado ya que en los procesos posteriores de extrusión e inyección se podrían obtener productos con partículas infundibles. Existen dos tipos de sistemas separadores de partículas pequeñas y de finos. Las zarandas que permiten clasificar el material por su tamaño. Para los finos se utilizan ciclones que permiten extraer las partículas finas.

Luego de los procesos anteriores, en el material triturado y filtrado es posible encontrar aún diferentes tipos de contaminantes que no fueron detectados en el proceso de desensamble y separación y que pueden afectar de manera negativa la recuperación y valorización del material obtenido en el mercado del reciclaje (Rodríguez-García y Weil, 2016). Por esto, en algunos casos, estos materiales triturados son llevados nuevamente a procesos de identificación y separación más especializados.

Para la limpieza y posterior aprovechamiento de estos materiales es necesario realizar diferentes procesos de limpieza y clasificación, los cuales se describen en los numerales 4.6 y 4.7 de esta guía.

4.6 ELIMINACIÓN DE MATERIALES FERROSOS Y NO FERROSOS

Se recomienda llevar a cabo este proceso posterior a la trituración, aun después de realizar procesos de selección manual de los materiales, para eliminar pequeñas piezas metálicas (tuercas, tornillos, alambres, grapas, etc.), que vienen ensambladas o adheridas a piezas plásticas y pueden afectar la calidad del material obtenido o, peor aún, generar daños en los equipos de procesamiento y herramientas.



SEPARACIÓN DE MATERIALES FERROSOS

La separación de los materiales ferrosos en el proceso de reciclaje de plásticos, se basa en las diferentes propiedades magnéticas que poseen los materiales (Dascalescu *et al.*, 2016; Jaykrishna, s. f.). De esta manera, los materiales ferrosos se pueden separar fácilmente ya que son fácilmente atraídos por imanes, los cuales son ubicados estratégicamente, bien sea en las bandas transportadoras o tolvas, y de esta manera separar el material ferroso del material plástico. La figura 8 muestra dos de los diseños más comúnmente usados para este proceso.

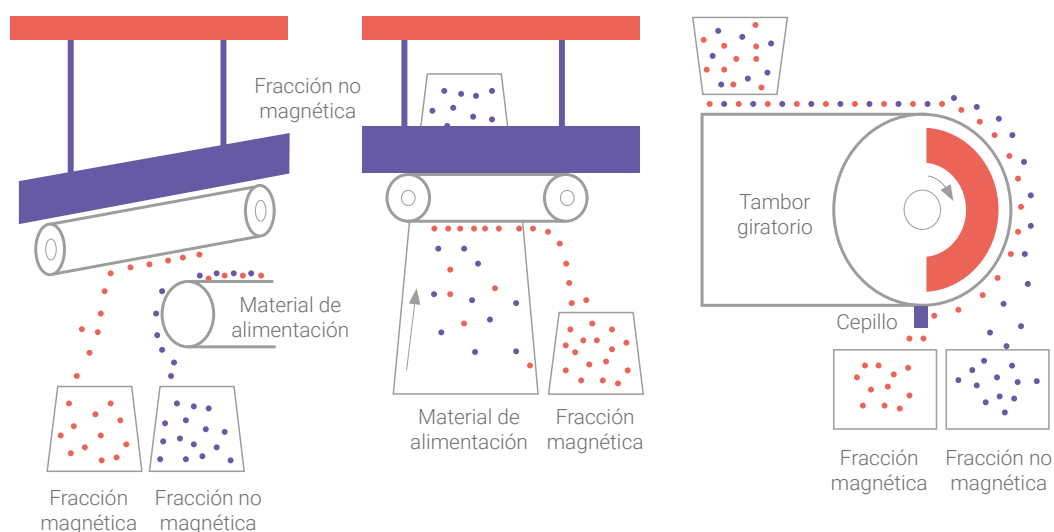
Los equipos más comunes usan separadores magnéticos (imanes de alta potencia) ubicados en las bandas transportadoras, que llevan el material de la trituración o clasificación a los otros procesos de reciclaje o a la entrada de los diferentes equipos que componen la línea de reciclaje.

Figura 8.
Esquemas de
separación
magnética
para materiales
ferrosos.

Convenciones

- Fracción magnética
- Fracción no magnética

Separador magnético overband (A) Separador magnético overband (B) Materias primas



Fuente: ICIPC (2021).



SEPARACIÓN DE MATERIALES NO FERROSOS

En cuanto a la separación de metales no ferrosos como cobre y aluminio, el sistema de separación más común usa el principio de las de corrientes de Eddy.

Este tipo de separador es ampliamente utilizado en las industrias de reciclaje de materiales, en especial en los gestores de fuentes RAEE y UDV (Jaykrishna, s. f.). Las corrientes de Eddy son una manifestación de inducción electromagnética que ocurre cuando se aplica un campo magnético a un material conductor. Al igual que los separadores magnéticos, estos equipos direccionan los materiales previamente inducidos a una placa o diodo conectado a una fuente de voltaje permanente, logrando así la separación de los materiales no conductores o inertes, en este caso el plástico (Ramachandra Rao, 2006). La figura 9 muestra el principio de un equipo de separación por corrientes de Eddy, acoplado a un separador magnético.

Con la combinación de estas técnicas, es posible obtener un plástico libre de materiales ferrosos y no ferrosos que puedan afectar su reciclabilidad (United Nations Environmental Program [UNEP] y United Nations University [UNU], Recycling - from e-waste to resources, 2009)

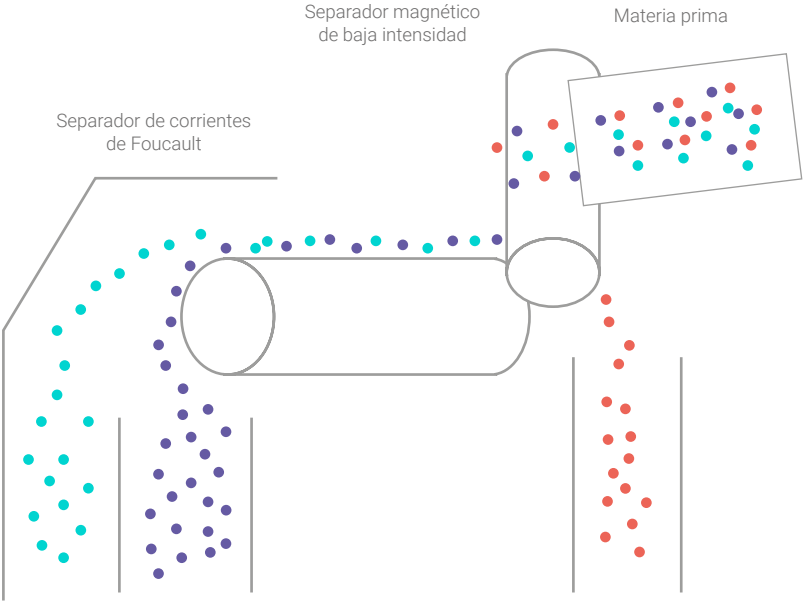
Figura 9.
Separador de materiales ferrosos y no ferrosos.

Convenciones

Restos de hierro

Metales no ferrosos

Inertes



Fuente: ICIPC (2021).

En la tabla 4 se describen las ventajas y las desventajas que posee este método de separación.

Tabla 4.
Ventajas y desventajas de la separación de materiales ferrosos y no ferrosos.

Ventajas	Desventajas
- Facilita la logística en los procesos posteriores de recuperación. - Alta productividad. - Elimina contaminantes y material particulado que puede afectar la reciclabilidad de los diferentes materiales.	X Elevada inversión inicial. X Solo permite separar partículas livianas o finas de material molido. X No permite la separación de diferentes tipos de materiales poliméricos.

Fuente: ICIPC (2020).

4.7 LIMPIEZA

Realizadas las etapas de clasificación y reducción de tamaño, en muchos casos los residuos plásticos aprovechables deben ser acondicionados para garantizar la calidad del material disponible para su posterior transformación.

El acondicionamiento es el conjunto de todas las operaciones requeridas para eliminar posibles contaminantes del material recuperado como grasas, polvo o incluso material que queda por fuera de los tamaños necesarios para su aprovechamiento. Cabe resaltar que es posible encontrar procesos de limpieza y acondicionamiento en diferentes etapas del proceso de reciclaje.

Existen diferentes tipos de procesos y equipos que ayudan a la limpieza de los materiales a recuperar, a continuación, se presentan los más importantes.



SEPARACIÓN POR TAMAÑO (CRIBADO)

Este proceso de limpieza y preselección busca facilitar el manejo de los residuos separando piezas que son muy grandes para su procesamiento, o por el contrario, demasiado pequeñas, según los procesos definidos por las empresas (Braun, 2013).

La clasificación por tamaños de los residuos plásticos suele hacerse justo después de la trituración para clasificar los componentes separados. Existen diferentes tipos de cribas industriales de tipo estático o móvil que se ajustan a las necesidades de cada proceso.

En la tabla 5 se describen las ventajas y las desventajas que posee este método de clasificación.

Tabla 5.
Ventajas y desventajas de la separación por tamaño.

Ventajas	Desventajas
Facilita la logística en los procesos posteriores de recuperación.	- Alta inversión inicial. - No permite separar diferentes tipos de materiales.

Fuente: ICIPC (2020).

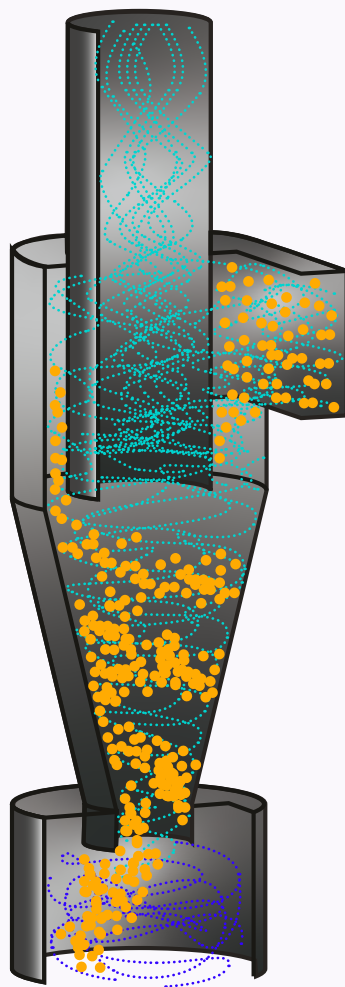


SEPARACIÓN POR AIRE (CICLÓN)

Al igual que el cribado, este proceso es usado para eliminar elementos no deseados en el proceso de reciclaje, en este caso material muy particulado (polvo), arena, papel y *foil* de aluminio (Dascalescu *et al.*, 2016; Braun, 2013). Su funcionamiento se basa en la fuerza centrífuga, siendo muy eficiente para separar los materiales livianos contaminantes del plástico. La figura 10 esquematiza el funcionamiento de un ciclón comúnmente usado para este proceso, en esta las partículas amarillas representan el plástico y las azules el material contaminante liviano.

Figura 10.

Ciclón para separación de contaminantes livianos.



Fuente: ICIPC (2021).

En la tabla 6 se describen las ventajas y las desventajas que posee este método de separación.

Tabla 6.
Ventajas y desventajas de la separación por aire.

Ventajas	Desventajas
• Facilita la logística en los procesos posteriores de recuperación. • Alta productividad. • Elimina contaminantes y material particulado que puede afectar la reciclabilidad de los diferentes materiales.	✗ Alta inversión inicial. ✗ Solo permite separar partículas livianas o finas de material molido. ✗ No permite la separación de diferentes tipos de materiales.

Fuente: ICIPC (2020).



LAVADO Y SECADO

El material se somete a un proceso de limpieza, con agua y detergentes, para retirar grasas e impurezas y posteriormente se seca antes de ser llevado a los procesos posteriores.

Es importante resaltar que las “formulaciones” de limpieza son consideradas en su mayoría secreto industrial en las plantas de reciclaje, pero en su mayoría contienen jabones, tensoactivos o soda cáustica para facilitar el desprendimiento de los contaminantes. Por lo tanto, dependiendo del nivel y tipo de impurezas se ajusta la “fórmula” de lavado y la temperatura del sistema.

También se resalta el hecho de que, posterior al lavado, es necesario realizar un proceso de enjuague que elimine los restos de jabones y tensoactivos, mismos que pueden afectar las propiedades del material plástico en mayor o menor medida dependiendo del tipo de plástico.

4.8 EXTRUSIÓN/PELETIZACIÓN

Ciertas aplicaciones finales (clientes) requieren que el material a procesar tenga una forma y tamaño controlado con el fin de asegurar la productividad y la calidad de sus procesos. Es por esta razón que en muchas ocasiones los materiales reciclados simplemente molidos no brindan la calidad suficiente para las aplicaciones más exigentes.

Una vez el material se encuentra adecuadamente separado y limpio se lleva al proceso de extrusión (ver figura 11), donde se puede realizar desde un simple peletizado hasta una reformulación con el uso de aditivos, mezclándolo con otros materiales de manera que se obtengan unas propiedades específicas.

Figura 11.
Proceso de
peletización.



Fuente: ICIPC (2021).

El proceso de peletizado cumple una triple función, homogenizar las fuentes heterogéneas de material reciclado, filtrar y limpiar el material fundido, y convertirlo en una nueva materia prima con características (tamaño, densidad de empaque y color) más consistentes y, por ende, confiables.

4.9 EMPAQUE

Debido a las incompatibilidades de algunos materiales plásticos mencionados anteriormente, antes de un aprovechamiento adecuado de los diferentes materiales plásticos recuperados, estos deben clasificarse por el tipo de plástico específico. Un plástico más limpio tendrá mejores propiedades y, por ende, un mayor uso en el mercado. Sin embargo, para algunos procesos y aplicaciones del reciclaje, no se requiere la separación de los materiales plásticos presentes en los residuos por tipo de resina, dependiendo de su aplicación o forma de recuperación final.

Para los procesos de selección y separación manuales de plásticos existen diferentes técnicas de identificación en el sitio donde se realiza el beneficio (*in situ*), las cuales pueden ser usadas por los gestores de manera rápida para reconocer el tipo de plástico de una muestra en particular, o incluso separar diferentes familias de plásticos en un proceso semicontinuo. Por ejemplo, la separación por densidad y la separación electrostática.

En el numeral 5 se describen las técnicas más usadas para la identificación y clasificación *in situ* de los plásticos, desde las más básicas hasta las más elaboradas.

5

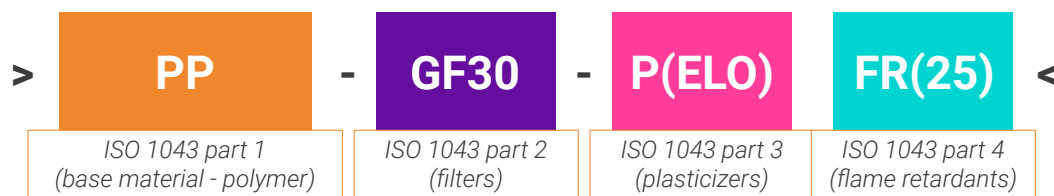


IDENTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS

5.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS PIEZAS SEGÚN EL ESTÁNDAR ISO 11469

La forma más fácil de identificación *in situ* de los plásticos es según la Norma ISO 11469 de 2016 (International Organization for Standardization, 2016). Esta norma especifica un sistema de marcado uniforme para productos que han sido fabricados con materiales plásticos, en el cual las piezas de plástico que pesen más de 100 gramos deben marcarse con un identificador visual. La figura 12 muestra un identificador completo y su interpretación.

Figura 12.
Marcación de
piezas plásticas
según ISO 11469
de 2016.



Fuente: International Organization for Standardization (2016).

Un identificador completo según la norma consta de 4 términos que indican el tipo de plástico (ISO 1043-1), materiales de relleno (ISO 1043-2), plastificantes (ISO 1043-3) y retardantes de llama (ISO 1043-4).

Tabla 7.
ISO 1043-1,
polímeros
básicos.

Símbolo	Material	Símbolo	Material
E/P	Etileno-propileno	PBN	Naftaloto de polibutileno
PBS	Succinato de polibutileno	PEN	Naftalato de polietileno
PBSA	Adipato de succinato de polibutileno	PEOX	Óxido de polietileno
PBT	Tereftalato de polibuti- leno	PES	Succinato de polietileno
PC	Policarbonato	PESTUR	Polietersulfona
PCCE	Poli(ciclohexilen dime- tilen ciclohexanodicar- boxilato)	pesu	Polietersulfona
PCO	Policicloolefina	PET	Tereftalatode polietileno
PCL	Policaprolactona	PEUR	Poliéter uretano
PCT	Tereftalato de polici- clohexilendimetileno	PF	Fenol-formaldehído
PCTFE	Policlorotrifluoroetileno	PFA	Polímero de perfluoro alcoxi alqueno
PDAP	Polidialiftalato	PHA	Polihidroxialcanaoatos
PDCPD	Polidiciclopentadieno	PHB	Polihidroxibutirato
PE	Polietileno	PI	Poliimida o poliisopreno
PE-C	Polietileno clorado	PIB	Poliisobutileno
PE-HD	Polietileno de alta densidad	PIR	Poliisocianurato
PE-LD	Polietileno de baja densidad	PK	Poli cetona
PE-LLD	Polietileno lineal de baja densidad	PLA	Ácido poliláctico
PE-MD	Polietileno de mediana densidad	PMI	Polimetacrilimida
PE-UHMWPE	Polietileno de ultra alto peso molecular	PMMA	Polimetilmetacrilato (acrílico)

Fuente: International Organization for Standarization (2016).

Tabla 8.
ISO 1043-2, cargas
y materiales de
refuerzo.

Símbolo	Material	Símbolo	Material
A	Aramida	B	Perlas, esferas, bolas
B	Boro	C	Virutas
C	Carbon	CM	Fieltro de vidrio
D	Trihidrato de alúmina	D	Finos, polvos
E	Arcilla	EM	Tapete de hebras conti- nuas (sin fin)
G	Vidrio	F	Polietersulfona
K	Carbonato de calcio	G	Tereftalatode polietileno
L	Celulosa	K	Fibra
M	Mineral	L	Tela tejida
ME	Metal	LF	Fibra larga
N	Orgánico natural (algo- dón, sisal, cáñamo, lino, Etc.)	M	Tapete (grueso)
P	Mica	N	No tejida (tela, delgada)
Q	Silica	NF	Nanofibras
S	Orgánico sintético(PT- FE finamente dividido, poliimidas o resinas termoestables)	NT	Nanotubos
T	Talco	P	Papel
W	Madera	S	escama
X	Na especiicado	T	Ácoido poliláctico
Z	Otros (no incluidos en esta lista)	V	Chapa
	Polietileno de ultra alto peso molecular	W	Tela tejida
		X	No especificado
		Y	Hilo
		Z	Otros (no especificados en esta lista)

Fuente: International Organization for Standarization (2016).

Tabla 9.
ISO 1043-3,
plastificantes.

Abreviación	Nombre común	Equivalente IUPAC*	CAS-RN**
ASE	Éster de ácido alquisulfónico	Alquisulfonatos o alcanosulfatos de alquilo	No conocido
ATBC (o TBAC)	Tributilo-acetilcitrato (o acetiltributilcitrato)	Tributilo-acetilcitrato	77-90-7
ATEC (o TEAC)	Trietil o-acetilcitrato (o acetil trietil citrato)	Trietil o-acetilcitrato	77-89-4
ATEHC	Citrato de actiltri-(2-etilhexilo)	Tris (2-etilexil) 2-actiloxi-propano 1,2,3- tricarboxilato	144-15-0
BAR	Butiloacetilricinoleato	Butil-12-acetoxioleato	140-04-5
BBP	Ftalato de bencilo butilo	Igual	85-68-7
BCHP	Ftalato de butil ciclohexilo	Igual	84-64-0
BNP	Ftalato de butil nonilo	Igual	No conocido
BOA	Octiladipato de bencilo	Adipato de bencil2-etilhexilo	3089-55-2
BOP	Octil ftalato de butilo	Ftalato de butil2-etilhexilo	85-69-8
BST	Estearato de butilo	Igual	123-95-5
DBA	Adipato de dibutilo	Igual	105-99-7
BEP	Ftalato de di-(2-butoxietilo)	Ftalato de di- (2-butoxietilo)	117-83-9
DBF	Fumarato de dibutilo	Igual	105-75-9
DBM	Maleato de dibutilo	Igual	105-76-0

Fuente: International Organization for Standarization (2016).

Tabla 10.
ISO 1043-4,
retardantes de llama.

Los códigos numéricos se encuentran agrupados dependiendo de la composición química del retardante de llama	
Compuestos halogenados	
10	Compuestos clorados alifáticos / alicíclicos
11	Compuestos clorados alifáticos / alicíclicos en combinación con compuestos de antimonio
12	Compuestos aromáticos clorados
13	Compuestos aromáticos clorados en combinación con compuestos de antimonio
14	Compuestos bromados alifáticos / alicíclicos
15	Compuestos bromados alifáticos / alicíclicos en combinación con compuestos de antimonio
16	Compuestos aromáticos bromados (excepto difenil éter bromado y bifenilos)
17	Compuestos aromáticos bromados (excepto difenil éter bromado y bifenilos) en combinación con compuestos de antimonio
18	Éter difenílico polibromado
19	Éter difenílico polibromado en combinación con compuestos de antimonio
20	Bifenilos polibromados
21	Bifenilos polibromados en combinación con compuestos de antimonio
22	Compuestos clorados y bromados alifáticos / alicíclicos
23,24	No asignado
25	Compuestos fluorados alifáticos
26 al 29	No asignado
Compuestos nitrogenados	
30	Compuestos de nitrógeno (confinados a melamina, cianurato de melamina, urea)
31 al 39	No asignado
Compuestos orgánicos de fósforo	
40	Compuestos orgánicos de fósforo libres de halógenos
41	Compuestos orgánicos clorados de fósforo
42	Compuestos orgánicos de fósforo bromados
43 al 49	No asignado
Compuestos nitrogenados	
50	Ortofosfatos de amonio
51	Polifosfatos de amonio
52	Fósforo rojo
53 al 59	No asignado

Fuente: International Organization for Standardization (2016).

En cuanto a la reciclabilidad mecánica de los materiales, la adecuada marcación del tipo de retardantes de llama usado en una pieza en específico permite identificar si un plástico contiene alguna sustancia del tipo contaminante orgánico persistente (COP) que limite su posterior aprovechamiento, dada su restricción.

Es importante resaltar el hecho que la presencia de sustancias declaradas como COP en algunas piezas plásticas, principalmente en aquellas que requieren propiedades de resistencia a la llama, evitan que estos materiales puedan ser reciclados, por lo cual su destino es el coprocesamiento. Esto se refiere a la destrucción controlada del material con el fin de evitar la liberación de estos contaminantes al ambiente o su interacción con las personas. Por lo anterior, su identificación y separación son de vital importancia.

En la tabla 11 se describen las ventajas y las desventajas que posee este método de identificación.

Tabla 11.

Ventajas y desventajas de la identificación de las piezas según el estándar ISO 11469.

Ventajas	Desventajas
• No requiere inversión en equipos.	✗ Los marcadores regularmente son difíciles de encontrar e interpretar. ✗ Probabilidad que la pieza no se encuentre correctamente identificada según la norma. ✗ Baja productividad en cuanto a separación de piezas (revisión 1 a 1). ✗ Alta posibilidad de contaminación cruzada de los materiales por marcaciones incorrectas o mala interpretación. ✗ Requiere un entrenamiento básico en los significados de los códigos.

Fuente: ICIPC (2020).

5.2 IDENTIFICACIÓN Y SEPARACIÓN POR DENSIDAD (PRUEBA DE FLOTACIÓN)

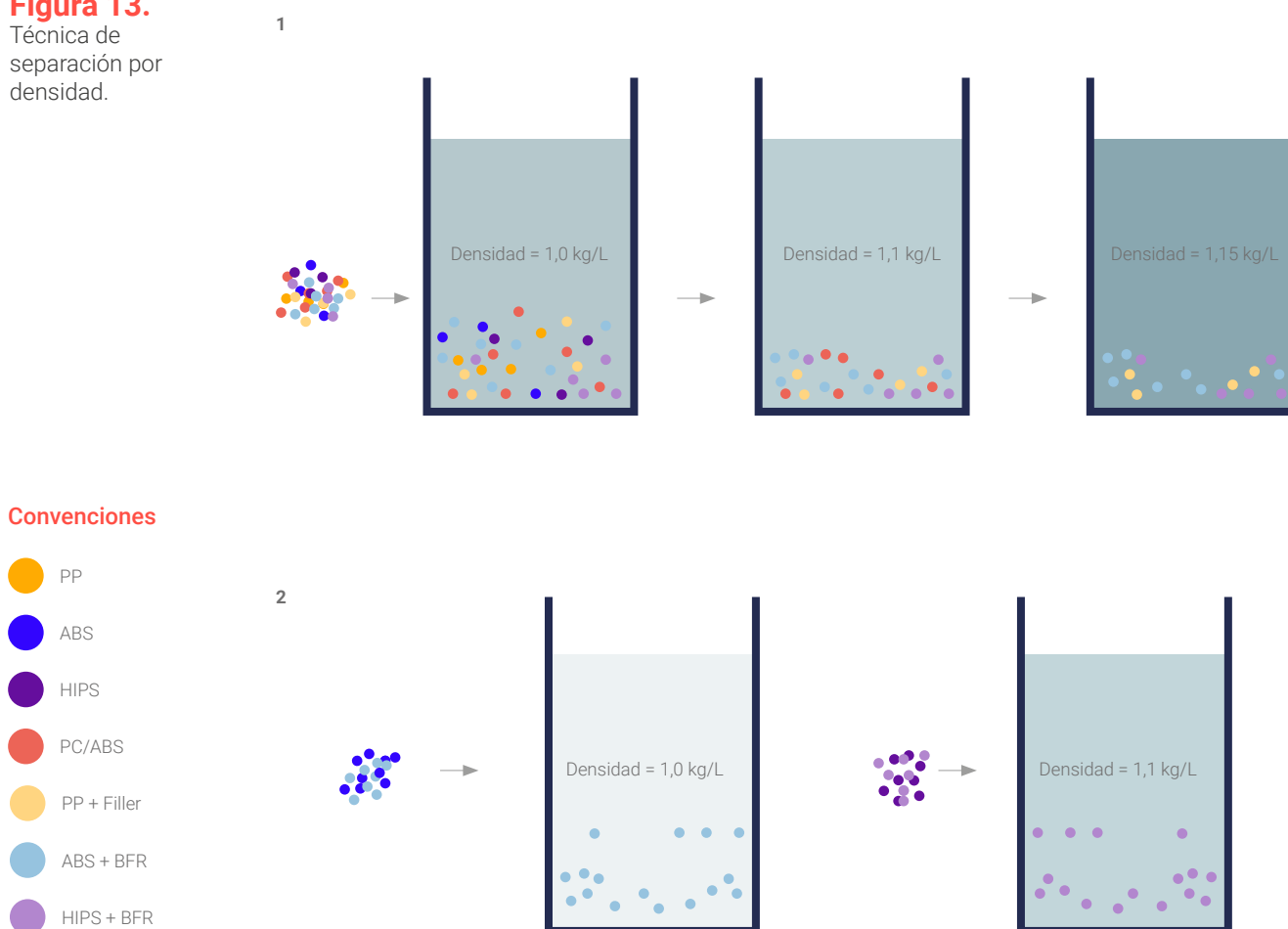
La densidad es una propiedad inherente de la materia y, dado que depende de la composición de un material, esta puede ser usada para identificar y separar diversos materiales entre sí. Este método se basa en el principio de que la densidad de un plástico depende de su tipo y de la presencia de ciertos aditivos. Es posible utilizar estas características para separar los plásticos con densidades más bajas de aquellos con densidades más altas, así

como de otros materiales contaminantes. Un ejemplo de esto se muestra en los rangos de densidades de los materiales como se aprecia en la figura 13 (Bill et al., 2019).

Esta técnica es sencilla de aplicar y no requiere en principio materiales o sustancias de alto valor. Se puede partir desde un recipiente con agua y sal natural disuelta (figura 13) hasta llegar a equipos complejos con capacidad de separar volúmenes significativos de material. La eficiencia y productividad de la técnica se basa en el diseño del equipo, la optimización de la recuperación y la pureza de ambas fracciones de densidad producidas.

Figura 13.

Técnica de separación por densidad.

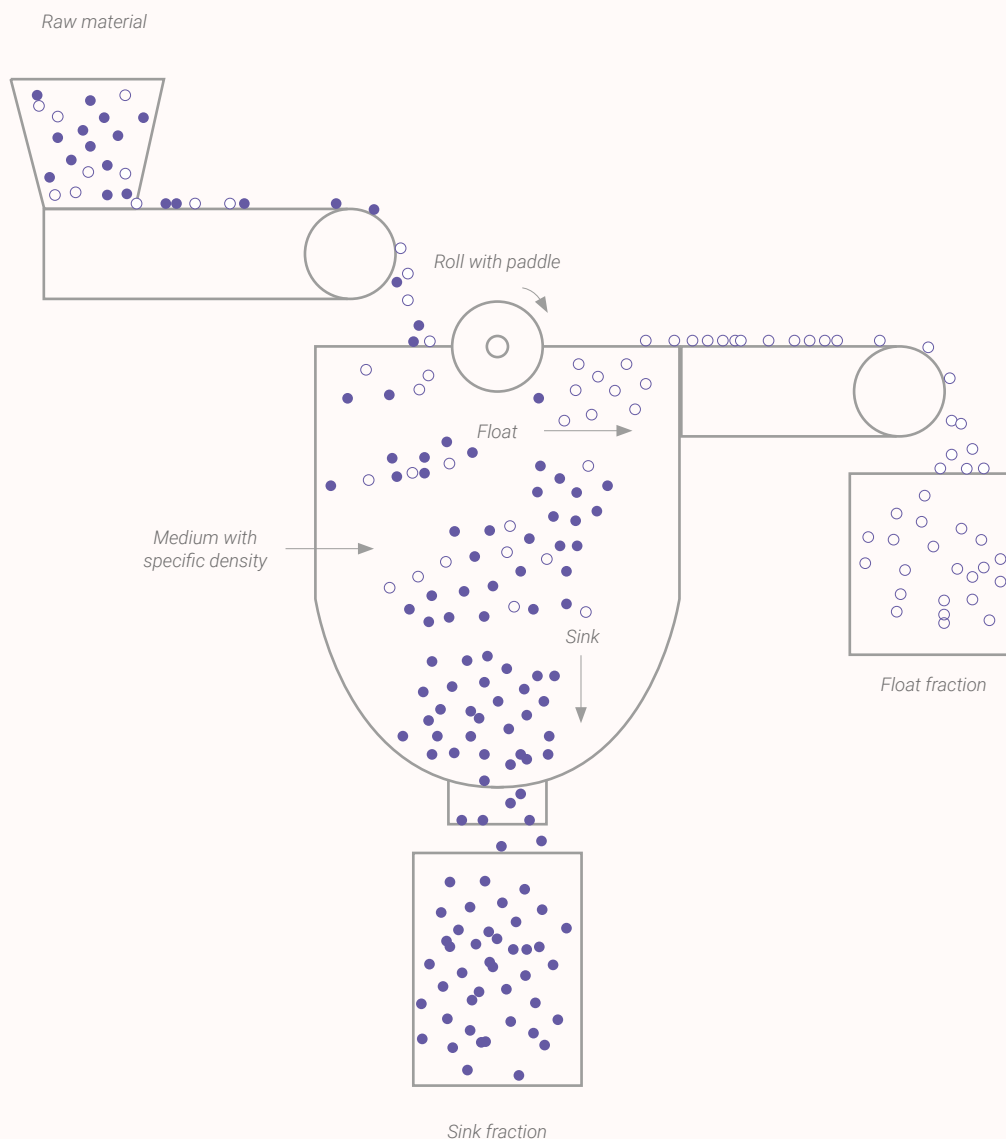


Fuente: Menad (2016).

A nivel industrial existen varios diseños disponibles para diferentes materiales. La figura 14 muestra el esquema de funcionamiento de un equipo de separación de materiales por la técnica de flotación, donde es posible retirar las dos fracciones de materiales separados de manera continua.

Figura 14.

Esquema de sistema industrial para la separación por flotación.

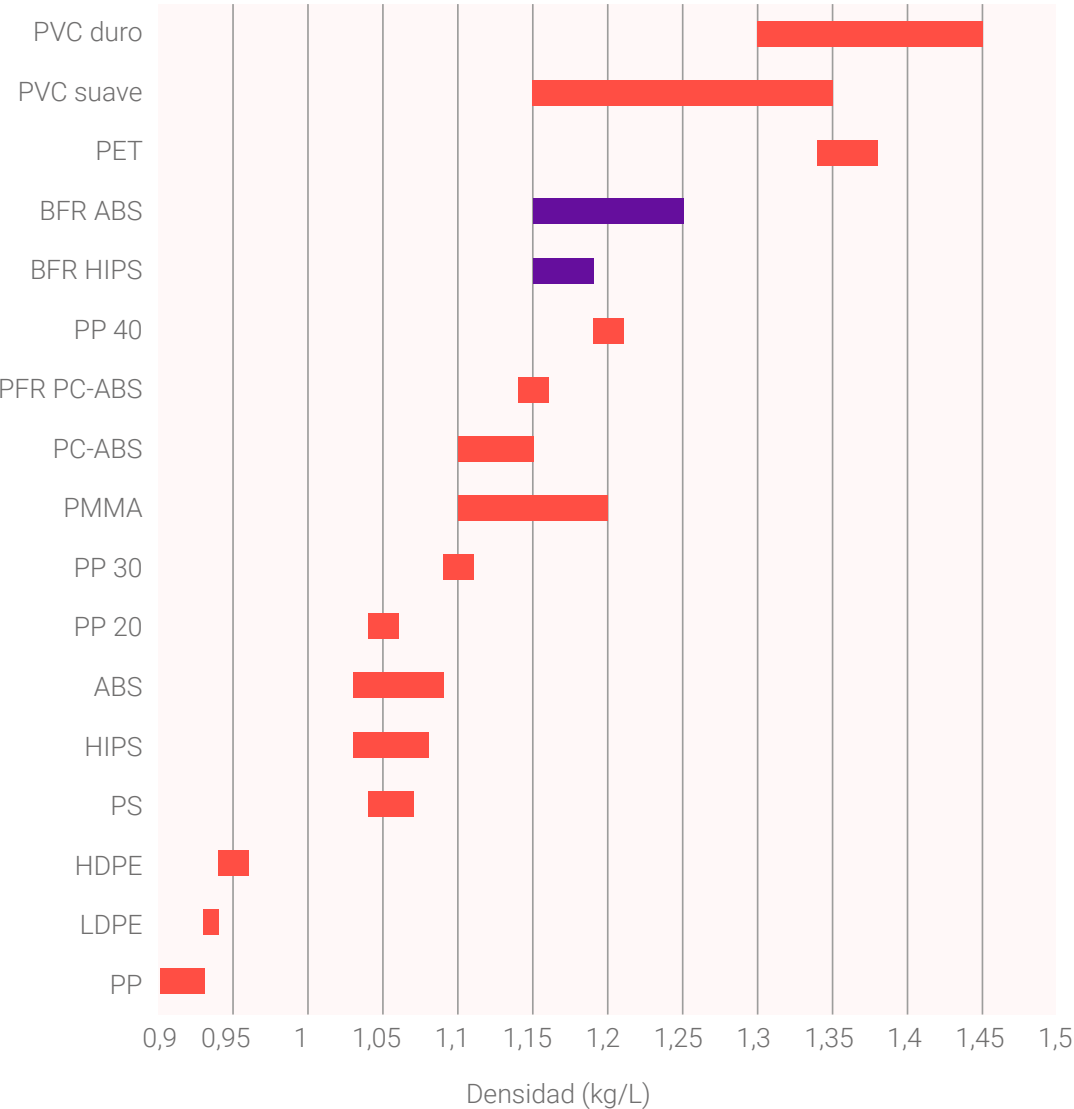


Fuente: Dascalescu et al. (2016).

Es importante tener presente que, en la medida que el material plástico tenga dentro de su composición otros elementos tales como cargas (talco, fibra de vidrio, carbonato, etc.), la densidad de la pieza será mayor a la del polímero virgen, de la misma manera otros elementos pueden hacer disminuir la densidad de la pieza (plastificantes o espumantes).

Otros casos en donde se puede alterar el valor de la densidad son las mezclas de polímeros, polímeros espumados, entre otros. En estos casos, esta técnica pierde precisión e incluso validez.

Figura 15.
Rango de densidades para algunos materiales plásticos.



Convenciones

● Densidad

Fuente: Bill et al. (2019).

Con base en la figura 15, se pueden identificar tres rangos útiles para la separación y selección de plásticos. El primero usando agua potable (densidad $\approx 1,0$ kg/L o lo que es lo mismo, $1,0$ g/cm³), en este medio al introducirse el material plástico a analizar solo flotarán las poliolefinas sin contenidos de cargas, mientras que los demás materiales, entre ellos poliolefinas aditivadas se precipitarán al fondo. El siguiente rango es usar una solución acuosa de densidad aproximada $1,1$ kg/L (o $1,1$ g/cm³), la cual es posible lograr mezclando agua potable con sal, tal como se muestra en la tabla 12 (Perry *et al.*, 2001).

Tabla 12.

Densidades aproximadas de soluciones salinas a diferentes temperaturas.

% de Sal	Densidad [kg/L]			
	Temperatura 0 °C	Temperatura 10 °C	Temperatura 25 °C	Temperatura 40 °C
1	1,00747	1,00707	1,00409	0,99908
2	1,01509	1,01442	1,01112	1,00593
4	1,03038	1,02920	1,02530	1,01977
8	1,06121	1,05907	1,05412	1,04798
12	1,09244	1,08946	1,08365	1,07699
16	1,12419	1,12056	1,1401	1,10688
20	1,15663	1,15254	1,14533	1,13774
24	1,18999	1,18557	1,17776	1,16971
26	1,20709	1,20254	1,19443	1,18614

Fuente: Perry (1966).

Con una solución salina de densidad 1,1 kg/L es posible separar por flotación materiales estirénicos como el ABS, el PS y el poliestireno de alto impacto (HIPS), así polipropilenos cargados con 20 % de CaCO_3 o fibra de vidrio (PP20).

Los rangos anteriores representan la gran mayoría de plásticos aprovechables de las fuentes analizadas. Sin embargo, una tercera prueba de flotación en una solución acuosa de densidad 1,15 kg/L permitirá separar mezclas de ABS+PC y polipropilenos cargados al 30 % (PP30). En este punto los materiales que se hundirían son PVC, polipropilenos muy cargados (PP40), metales, cerámicas y, principalmente, plásticos aditivados con retardantes de llama, entre estos últimos los contaminados no recuperables como los ABS con retardantes de llama bromados. De esta manera es posible separar materiales no reciclables mecánicamente de los aprovechables.

La clave para el correcto funcionamiento de esta técnica es obtener una solución con la densidad adecuada. Para esto, se puede hacer uso de diferentes sustancias, como agua, alcohol, glicerol y algunos modificadores de la densidad, como sal común (NaCl), cloruro de potasio (KCl), sulfato de magnesio (MgSO_4), entre otros. Mezclas de estos diferentes componentes permiten obtener las densidades requeridas. Además, es recomendable el uso de algunos tensoactivos y mezcladores para disminuir la tensión superficial del medio acuoso y permitir una adecuada separación de las diferentes fases de materiales.

Como se menciona anteriormente, dos de las densidades clave para la separación de materiales de fuentes RAEE y UDV son 1 g/cm³ y 1,1 g/cm³, donde la primera es obtenida con agua común. Por otro lado, la solución con densidad 1,1 g/cm³ es obtenida por la mezcla de 1 litro de agua dulce con 150 gramos de sal común, 180 gramos de potasio o 110 gramos de magnesio (Bill *et al.*, 2019), tal como se aprecia en la tabla 13.

Tabla 13.
Mezclas sugeridas para la obtención de fluidos con diferentes densidades.

Densidad deseada por litro de agua a temperatura ambiente (23°C) [G/CM³]	Cantidad de sal común (NaCl) (2,16 g/cm³) [gramos]	Cantidad de potasio (K)(2,1 g/cm³) [gramos]	Cantidad de magnesio (Mg) (1,738 g/cm³) [gramos]
1	0	0	0
1,1	150	180	110
1,15	220	N. A.	N. A.

Fuente: ICIPC (2020).

Además, es muy importante mantener un control adecuado de la densidad del medio acuoso, ya que esta puede variar en función de la presión, la temperatura, la concentración de aditivos o por los contaminantes presentes en los residuos separados. Para el control de la densidad se recomienda el uso de equipos o instrumentos como el hidrómetro el cual permite conocer la densidad de un líquido en relación con la densidad del agua. De esta manera, es posible ajustar la densidad inicial del medio como controlarla durante los procesos de separación.

En la tabla 14 se describen las ventajas y las desventajas que posee este método de identificación y separación.

Tabla 14.
Ventajas y desventajas de la separación por densidad.

Ventajas	Desventajas
● Inversión inicial baja o media dependiendo del equipo requerido. ● Productividad media o alta dependiendo del equipo usado. ● Fácil de implementar.	✗ Difícil separación de resinas muy próximas en densidad o resinas con contenido de pigmentos y cargas que modifican su densidad. ✗ Requiere uso de líquidos y procesos de secado posteriores. ✗ Algunas de las sustancias usadas para la modificación de la densidad del medio acuoso pueden ser peligrosas o de alto valor. ✗ Requiere un adecuado control de la densidad para una correcta separación ✗ La solución puede irse contaminando e ir cambiando su densidad, lo cual puede alterar los resultados.

Fuente: ICIPC (2020).

5.3 IDENTIFICACIÓN POR EL COMPORTAMIENTO FRENTE A LA LLAMA

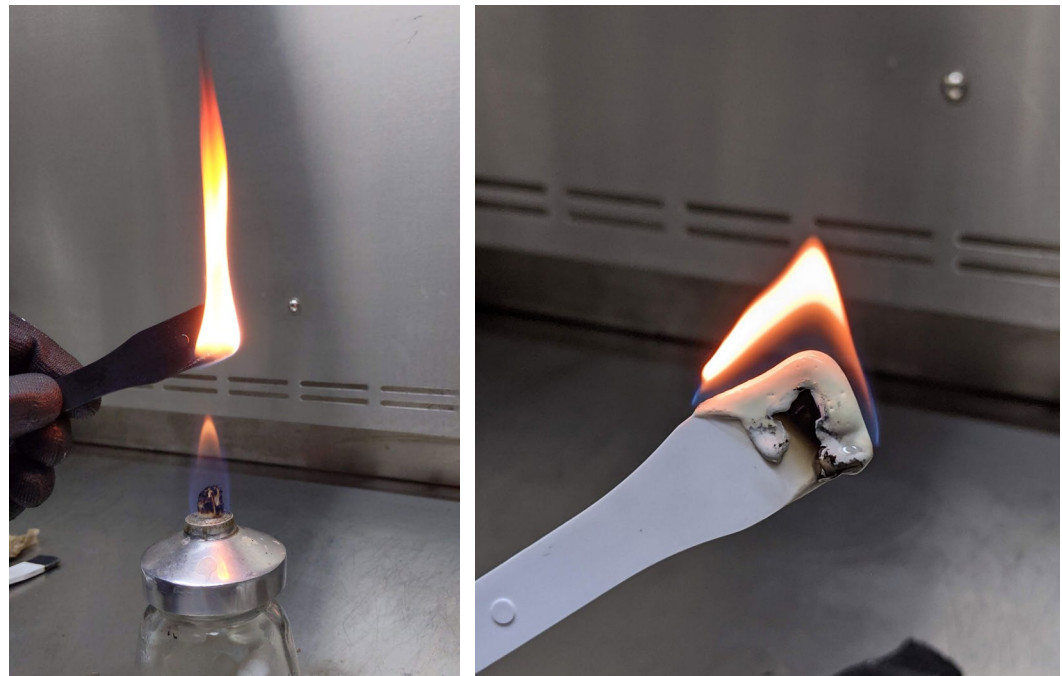


CONTACTO DIRECTO A LA LLAMA

Esta prueba consiste en exponer un material a la llama directa por medio de un encendedor o un mechero y observar el comportamiento de la muestra, como se observa en la figura 16.

Figura 16.

Prueba de la llama en diferentes materiales plásticos



Fuente: ICIPC (2020).

Este proceso se evalúa por medio de la observación:

- Tipo de llama.
- Si hay goteo o no.
- Generación de hollín.
- Humo.
- Color de la llama.
- Olor.

Basado en esta información y en las tablas de identificación de polímeros, se muestran en la tabla 15 los lineamientos de identificación por llama.

Tabla 15.
Comportamiento
de plásticos de
fuentes RAEE y
UDV a la llama.

Material	Comportamiento a la llama*	Color llama	Tipo de goteo	Olor
PP	II	Llama amarilla con centro azul.	Arde con goteo.	Vapores con olor a parafina.
PEBD	II	Llama amarilla con centro azul.	Arde con goteo.	Vapores con olor a parafina.
PEAD				
PS	II	Llama amarilla, parpadea, brillante.	Humos negros con desprendimiento de hollín.	Olor similar a icopor quemado. El HIPS además tiene olor a caucho.
HIPS				
ABS	II	Llama amarilla, parpadea, brillante.	Desprendimiento de hollín.	Olor similar al PS y la canela.
PA6	I/II	Llama con borde amarillo azulado.	Crujiente, gotea formando fibras.	Olor similar a cabello quemado.
PC	I	Llama brillante.	Burbujeante y desprende hollín.	Leve olor a fenol.
PVC-U	I	Llama amarilla y levemente verde.		Olor ácido.
PET	I/II	Llama amarilla.		

Convenciones

- 0:** Dificultad para encender.
I: Se quema mientras esté la llama, pero se extingue al retirar la llama.
II: Continúa ardiendo después de encendido.
III: Arde vigorosamente.

Fuente: Braun (2013).



CONTACTO INDIRECTO A LA LLAMA

Otra forma simple de identificar el ABS, PVC y PET de los demás polímeros es mediante la medida del grado de acidez o alcalinidad de los humos al quemarse (pH), pero, para hacerlo de una manera segura, se requiere que la llama no se encuentre en contacto directo con el polímero, para esto la combustión debe hacerse de manera indirecta mediante la técnica conocida como pirólisis (ver figura 17).

La tabla 16 muestra los pH de los vapores de diferentes polímeros comúnmente encontrados en artículos RAEE y UDV. La formación de vapores con pH neutro indica que el material generalmente pertenece al grupo de las poliolefinas (PE/PP). Los vapores ligeramente básicos son propios de materiales como el ABS o la poliamida. Por último, materiales como el PVC o el PET desarrollan vapores fuertemente ácidos.

Tabla 16.
Rangos pH de diferentes materiales plásticos.

Material	PH-paper		
	0,5 - 4,0	5,0 - 5,5	8,0 - 9,5
ABS			X
ABS/PC		X	
PS		X	
HIPS		X	
PVC	X		
PE		X	
PP		X	

Fuente: ICIPC (2020).

Para examinar el comportamiento de un polímero por pirólisis, se agrega una pequeña muestra a un tubo de ensayo de vidrio resistente a la temperatura. Luego, sujetando el extremo superior del tubo con un clip o un par de pinzas (ver figura 17), se expone el tubo a la llama. Finalmente, en el extremo abierto del tubo, se ubica un papel de pH y se observa el cambio de color según la tabla de referencia del papel indicador.

Figura 17.
Prueba de pirólisis
y papel indicador
de pH.



Fuente: ICIPC (2020).

En la tabla 17 se describen las ventajas y las desventajas que posee esta técnica de identificación.

Tabla 17.
Ventajas y
desventajas de
la separación por
comportamiento
a la llama.

Ventajas	Desventajas
• Inversión inicial baja. • Fácil de implementar.	✗ Baja productividad, una muestra por vez. ✗ Exposición a gases y vapores. ✗ Posibilidad de contaminación cruzada de los materiales recuperados por mala interpretación. ✗ Dificultad de identificar materiales con vapores de pH similares (PET y PVC o PS, HIPS; PE y PP).

Fuente: ICIPC (2020).

5.4 IDENTIFICACIÓN POR CALENTAMIENTO CONTROLADO: FUSIÓN Y ABLANDAMIENTO

Esta técnica consiste en exponer una muestra a una fuente de calor que tenga una temperatura controlada ($\pm 5^\circ\text{C}$) tal es el caso por ejemplo de las planchas de calefacción (figura 18). Su principio se basa en que los polímeros tienen temperaturas a partir de las cuales comienzan a ablandarse, e incluso a fundirse, y estas temperaturas son características de la estructura química del material y se pueden emplear para diferenciar algunos de ellos (Braun, 2013).

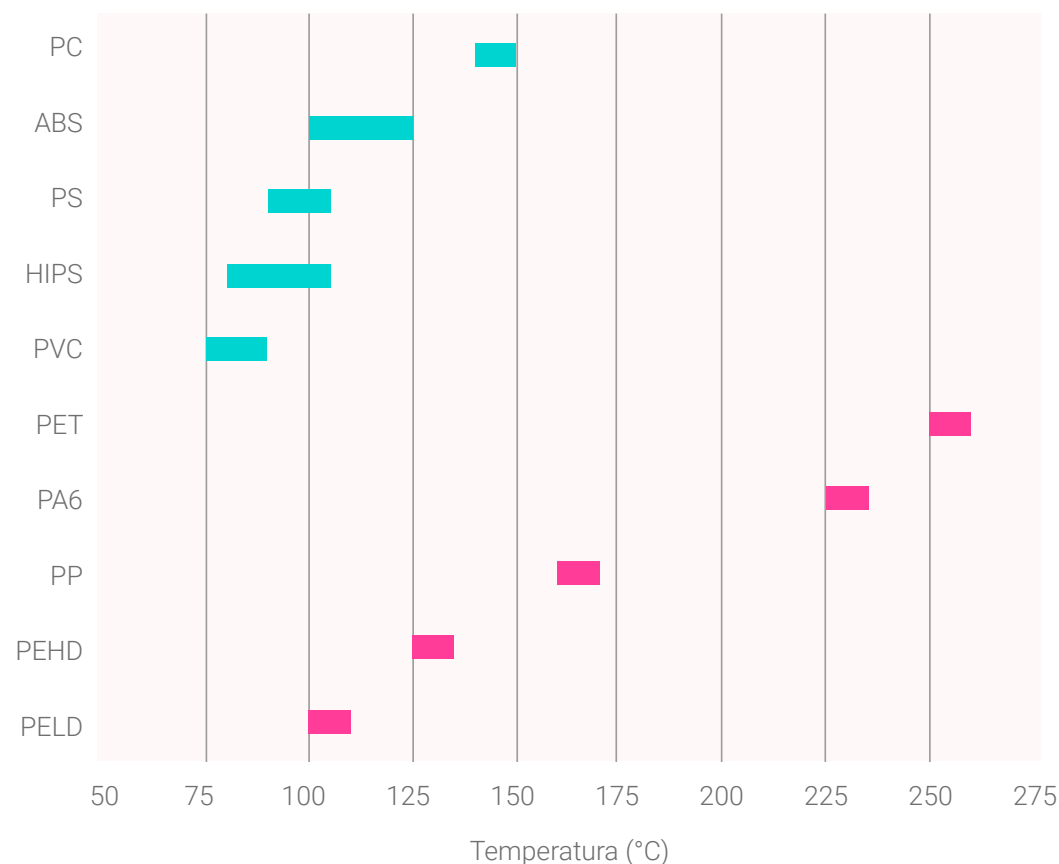
La tabla 18 presenta algunas temperaturas de ablandamiento y fusión de algunos materiales plásticos normalmente encontrados en fuentes RAEE y UDV.

Tabla 18.

Rangos de temperaturas de ablandamiento / fusión de algunos materiales plásticos.

Convenciones

- Amorfos (ablandamiento)
- Semicristalinos (Fusión)



Fuente: ICIPC (2020).

Figura 18.
Plancha de calor.



Fuente: ICIPC (2021).

En la tabla 19 se describen las ventajas y las desventajas que posee esta técnica de identificación.

Tabla 19.
Ventajas y desventajas de la identificación por calentamiento controlado.

Ventajas	Desventajas
• Inversión inicial baja. • Fácil de implementar.	✗ Baja productividad, una muestra por vez. ✗ Riesgo de exposición a superficies calientes. ✗ Posibilidad de contaminación cruzada de los materiales recuperados por mala interpretación. ✗ Dificultad de identificar materiales con temperaturas de fusión o ablandamientos similares.

Fuente: ICIPC (2020).

5.5 CUANTIFICACIÓN DE LA PRESENCIA DE CARGAS POR MUFLA

Esta técnica consiste en llevar una muestra de plástico a temperaturas elevadas con el objetivo de cuantificar la cantidad de cargas remanentes de una forma general (Braun, 2013) eliminando la presencia del polímero.

Al calentar la muestra hasta altas temperaturas (superior a los 600 °C), se produce una descomposición del polímero y de otros componentes. Sin embargo, existen cargas como el talco, sílices, dióxido de titanio, óxidos de calcio, etc., que pueden resistir estas temperaturas sin degradarse y quedar como residuo o cenizas al final del proceso. Una vez se obtiene este residuo se comparan los pesos iniciales y finales de la muestra y se estima el contenido de cargas.

Para la aplicación de esta técnica es necesario tener un equipo que permita elevar las temperaturas de la muestra hasta los 900 °C; por ejemplo, una mufla. Además, si se desea cuantificar el contenido de cargas presentes en la muestra, es necesario tener una balanza con la precisión necesaria para medir el cambio del peso inicial y final de la muestra.

En la tabla 20 se describen las ventajas y las desventajas que posee esta técnica de identificación.

Tabla 20.
Ventajas y desventajas de la cuantificación de la presencia de cargas por mufla.

Ventajas	Desventajas
● Inversión inicial baja. ● Fácil de implementar.	✗ Baja productividad, una muestra por vez. ✗ Exposición a superficies calientes. ✗ No permite identificar el tipo de polímero ni el tipo específico de cargas. ✗ Los datos de contenido de carga son aproximados y depende del control del proceso de incineración y la precisión de los equipos de medición.

Fuente: ICIPC (2020).

5.6 IDENTIFICACIÓN POR EXPOSICIÓN A SOLVENTES

Esta técnica consiste en exponer una muestra a uno o varios solventes y analizar su comportamiento. Su aplicación se fundamenta en que diferentes familias de polímeros tienen mayor o menor afinidad a diferentes tipos de solventes, lo cual permite identificar por descarte sus materiales o familias de acuerdo a sus reacciones. Un ejemplo de esto se presenta en la tabla 21 (Braun, 2013).

Tabla 21.
Reacción de materiales plásticos de fuentes RAEE a diferentes solventes.

Material	Gasolina	Tolueno	Diclorometano	Eter etílico	Acetona	Etil Acetato	Etanol	Limoneno	Otros
PP	i/h	i/h	i/h	i	i	i	i	-	Hidrocarburos
PEBD	i/h	h	i	i/h	i/h	i/h	i	-	Triloroenceno, p-xileno, Decano
PEAD	i/h	h	i	i/h	i/h	i/h	i	-	
PS	h/s	s	s	i/h	s	s	i	s	TCC, Xileno (caliente), THF
HIPS	h/s	s	s	s	s	s	i	s	
ABS	h	s	s	s	s	s	i	i	
PA6	i	i	i	i	i	i	i	-	Ac. Fórmico, Ac. Sulfúrico, DMF, m-cresol
PC	i	h	s	h	h	h	i	i	
PVC	i	i/h	i/h	i	i/s	i/h	i	-	Xileno (caliente), THF, DMF, ciclohexanona
PET	i	i	i	i	i/h	h	i	-	Ac. tricoloroacético, o-clorofenol, m-cresol, Nitroenceno

Convenciones

THF: Tetrahidrofurano
s: soluble
i: insoluble
DFM: Dimetilformamida
h: hinchamiento
- : sin información
TCC: Tetracloruro de carbono

Fuente: ICIPC (2020).

De esta manera, es posible por ejemplo diferenciar PS y ABS al poner los materiales en contacto con el limoneno. En este caso, la muestra de PS es atacada por el limoneno mientras la muestra de ABS no.

Es importante tener en cuenta que la solubilidad de un material plástico depende mucho de su estructura química y, en cierta medida, del peso molecular y las cargas o mezclas presentes, por lo que esta técnica no siempre permite una identificación inequívoca.

Para esta técnica cabe señalar que la inflamabilidad y la toxicidad de muchos solventes requieren un cuidado especial en el manejo, por lo que se recomienda empezar con el uso de solventes o sustancias de riesgo moderado como el limoneno o la gasolina.

En la tabla 22 se describen las ventajas y las desventajas que posee esta técnica de identificación.

Tabla 22.
Ventajas y desventajas de la identificación por exposición a solventes.

Ventajas	Desventajas
● Inversión inicial media. ● Fácil de implementar.	✗ Baja productividad, una muestra por vez. ✗ Exposición a gases, sustancias y vapores potencialmente nocivos. ✗ Posibilidad de contaminación cruzada de los materiales recuperados por mala interpretación. ✗ Dificultad de identificar materiales muy similares por comportamiento a los solventes (ej. PP y PE).

Fuente: ICIPC (2020).

5.7

IDENTIFICACIÓN POR CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS BÁSICAS



TEST DE DOBLADO

Una simple prueba de doblez hasta los 180° ayuda a distinguir ciertos plásticos. El PS, por ejemplo, es rígido y se rompe fácilmente al doblarse, por su parte el HIPS dobla fácilmente sin romperse. Adicionalmente, los materiales semicristalinos tienden a mostrar marcas blancas de la línea de doblez, diferenciándolos fácilmente de los materiales amorfos.



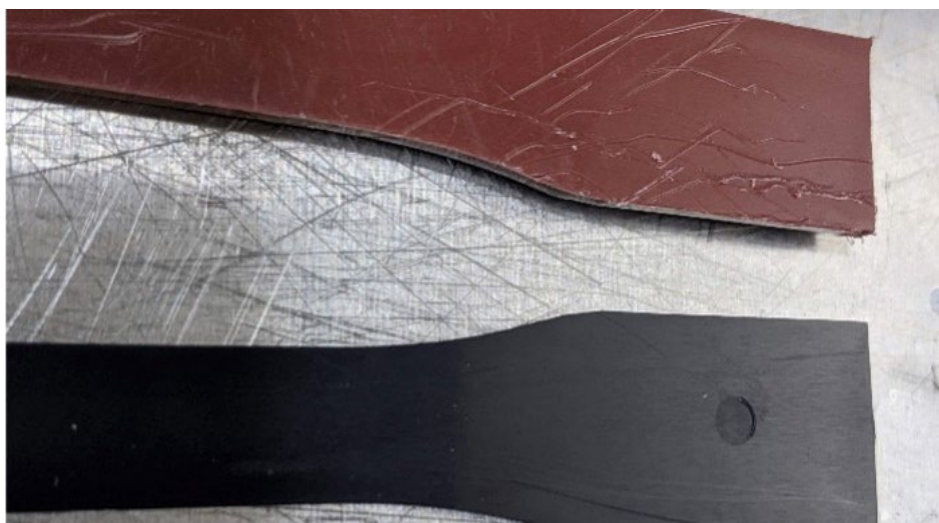
DUREZA O RESISTENCIA AL RAYADO

Una verificación muy básica de la dureza de un plástico es su comportamiento cuando se raya por ejemplo con la uña o un metal suave (aluminio o cobre) tal como se aprecia en la figura 19.

- Algunos plásticos no se rayan fácilmente: PP, ABS y PS.
- Algunos plásticos que se rayan o marcan fácilmente: los plásticos flexibles o cauchosos, como por ejemplo el PE o el PVC flexible.

Figura 19.

Ejemplo de marcas y rayas en un plástico.



Fuente: ICIPC (2020).



SONIDO AL GOLPEAR

Los plásticos tienen un sonido distintivo al ser golpeados. Dado que los sonidos son difíciles de describir, es mejor probarlo uno mismo con plásticos de tipo conocido. Este tipo de prueba funciona mejor con piezas más grandes (por ejemplo, carcasas enteras). Por ejemplo, para diferenciar el poliestireno del PMMA, al dejar caer una muestra sobre una superficie plana no metálica, el poliestireno suena como una lámina metálica mientras que el PMMA suena como madera dura.

En la tabla 23 se describen las ventajas y las desventajas que posee esta técnica de identificación.

Tabla 23.
Ventajas y desventajas de la identificación por pruebas físicas y mecánicas básicas.

Ventajas	Desventajas
● Inversión inicial baja. ● Fácil de implementar.	✗ No recomendado como prácticas de identificación. ✗ Baja productividad, una muestra por vez. ✗ Riesgo alto de identificación inadecuada de los materiales. ✗ Dificultad de identificar materiales muy similares por comportamiento físico.

Fuente: ICIPC (2020).

5.8 DIAGRAMA DE FLUJO PARA IDENTIFICACIÓN *IN SITU*

Con base en los criterios anteriormente expresados, el ICIPC ha elaborado un diagrama de flujo que facilita la identificación de los materiales más comunes encontrados en los RAEE y UDV, para el cual se requiere de una mínima inversión y un entrenamiento básico.

El diagrama se presenta en la figura 20 y permite la identificación de:

- Polietilenos (PE).
- Polipropilenos (PP).
- Poliestireno de propósito general (PS).
- Poliestireno de alto Impacto (HIPS).
- Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

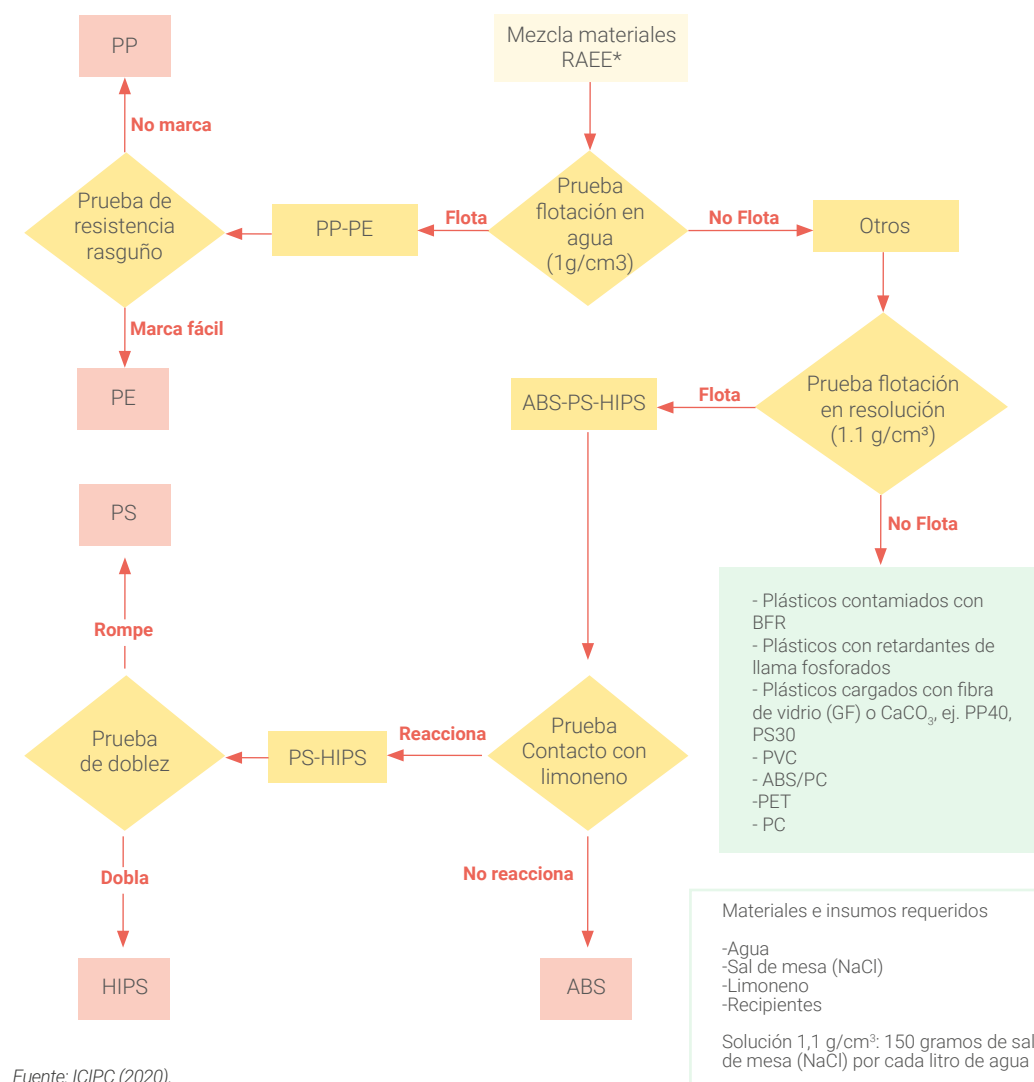
Po otro lado, requerirán de un proceso de identificación más exhaustivo, las fracciones de plásticos que potencialmente pueden contener COP, retardantes de llama, aquellos cargados con fibras de vidrio, carbonato de calcio o talco.

Figura 20.
Diagrama de flujo
para la identificación
de materiales en sitio.

Convenciones

- Producto intermedio
- Materiales aptos para reciclajes, libres de contaminantes
- Método de serparación / identificación de plásticos
- Mezcla de material no aprovechables. Se pueden hacer procesos posteriores de clasificación si es requerido.

*Se parte de una mezcla de los materiales comunmente encontrados en fuentes RAEE: ABS, ABS/PC, PP, PE, PS, HIPS, PC, ABS-BFR, PS-BFR y en menor cantidad PVC, PMMA, PLA y otros.



5.9 TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS DE IDENTIFICACIÓN *IN SITU*

De los métodos analíticos y de laboratorio mencionados en la sección 5.10, actualmente existen algunos equipos e instrumentos relativamente asequibles, fáciles de usar y de carácter portátil, los cuales permiten identificar e incluso realizar controles de calidad de manera fácil y rápida con alta confianza en los resultados. A continuación, se presentan algunos de los equipos y tecnologías más adecuadas para la identificación rápida de plásticos.



PISTOLA PORTABLE DE ESPECTROFOTOMETRÍA INFRARROJA (FTIR)

La espectrofotometría infrarroja mediante equipos manuales permite identificar materiales mediante su “huella dactilar en el espectro infrarrojo”.



FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La fluorescencia de rayos X mediante equipos manuales permite identificar ciertos compuestos de interés, por ejemplo, elementos bromados de manera rápida.

Técnica útil para separar materiales posiblemente contaminados con COP.



INDETIPOL QA2

El IdentiPol es un equipo diseñado por la compañía Lacerta Technology para proporcionar al personal técnico y de planta una herramienta que permite identificar el tipo de plástico del que está hecha una muestra, ya que el equipo se caracteriza como una biblioteca de termoplásticos. Entre las pruebas realizadas por el equipo se encuentran la identificación de las propiedades térmicas del material como la temperatura de fusión de cristales (T_m) y la temperatura de transición vítrea (T_g). Adicionalmente, el equipo hace una

medición rápida de la rigidez del material. Según reporta la compañía, el equipo puede acoplarse con componentes adicionales para realizar mediciones de índice de fluidez (MFI) y tiempo de inducción a la oxidación (OIT).

De esta manera el equipo permite identificar materiales y adicionalmente realizar controles de calidad al comparar los materiales analizados con los previamente medidos en la base de datos.

5.10 TÉCNICAS ANALÍTICAS DE IDENTIFICACIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS

Como se menciona en cada una de las técnicas y equipos presentados anteriormente, todos los métodos de identificación y de separación tanto manuales como industriales presentan grados de confiabilidad, siendo necesario pruebas analíticas complementarias para asegurar la calidad de los materiales y productos obtenidos.

Para esto existen diferentes métodos para la caracterización analítica de los materiales plásticos, sus mezclas y composiciones específicas. Entre ellos se encuentran.



CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido o DSC es una técnica que sirve para identificar las transiciones térmicas de los materiales: temperaturas de transición vítrea (T_g), temperaturas de fusión (T_m) y temperatura de cristalización (T_c).

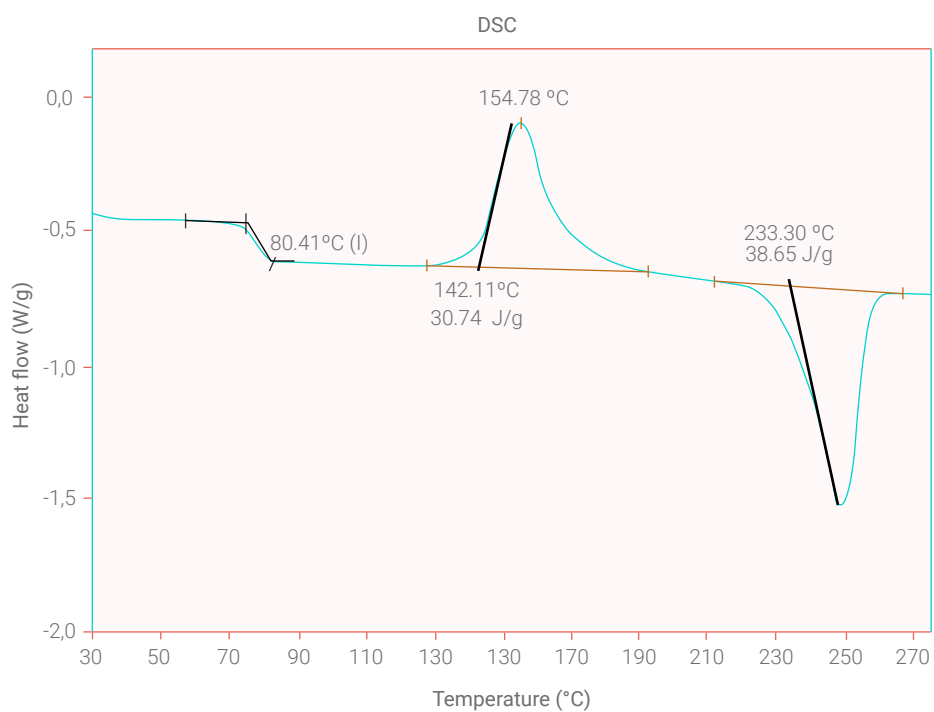
A su vez, permite evidenciar mezclas de materiales, pues cada material tendrá sus temperaturas de transición características. Un ejemplo del resultado puede verse en la figura 21.

Esta técnica resulta especialmente útil para estimar que tipo o tipos de materiales contiene la pieza analizada, así como una guía importante para fijar las temperaturas de procesamiento (inyección o extrusión).

Figura 21.
Curva característica
de DSC y equipo.

Sample: PET USP
Size: 11.9100 mg
Method: USP 661 PET
Comment: T: 25.21°C HR: 22% CMA/CO

Operator: IC IP C
Run Date: 21 Feb 2020
Instrument: DSC Q200 V24.10 Build 122



Fuente: ICIPC (2020).

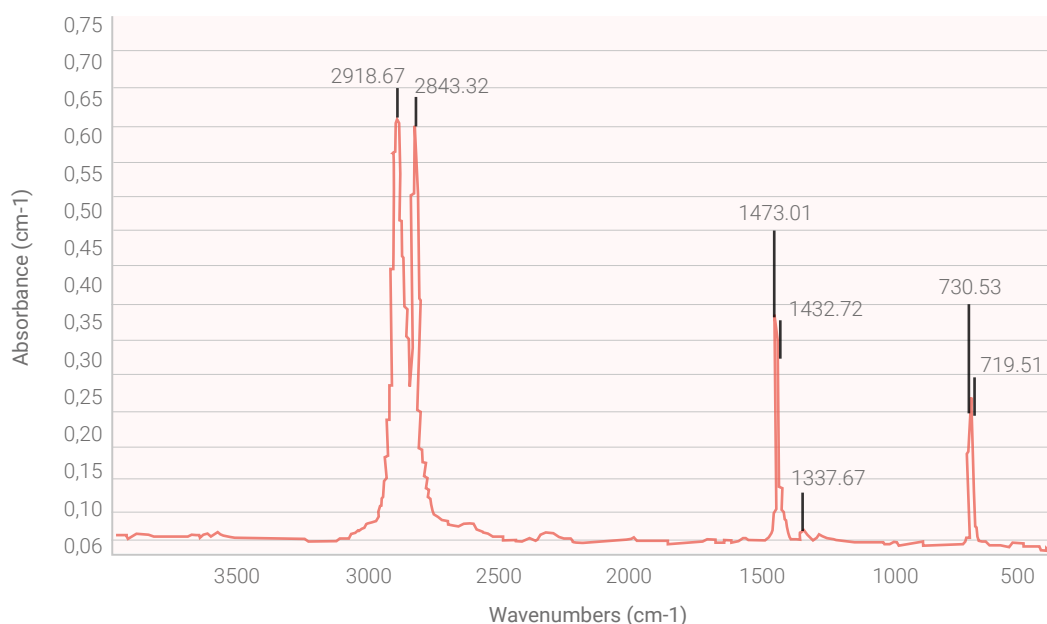
Esta técnica permite al igual evaluar otras características importantes de los materiales como su estabilidad térmica, determinando las temperaturas y condiciones bajo las cuales se inicia la degradación.



ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA (FTIR)

La espectroscopía infrarroja se basa en el hecho de que la luz en la región de longitudes de onda entre 750 nm y 1 mm hace que las moléculas vibren. Estas vibraciones resultantes de la absorción de la luz aparecen en el espectro infrarrojo como bandas de absorción, conocida como la huella digital de la muestra. Un resultado típico de cómo se observa el espectro infrarrojo de un material se muestra en la figura 22 (específicamente del PE).

Figura 22.
Espectro IR de un polietileno.



Fuente: ICIPC (2020).

Este método por su simpleza y eficacia ha ganado gran relevancia en la industria tanto de plásticos como aditivos, con lo cual existen amplias colecciones y bancos de datos de espectros IR, que permiten determinar con un alto grado de confiabilidad la semejanza o correspondencia de una muestra contra la información contenida en las bases de datos. Incluso se puede caracterizar materiales o formulaciones nuevas y guardar estos espectros para futuras comparaciones.



ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

Este método proporciona información sobre cambios en el peso ocurridos al calentar una muestra. De esta manera, permite cuantificar algunos de los componentes individuales que contiene una muestra de manera porcentual; por ejemplo, el contenido de plastificantes, polímero y ciertos tipos de cargas específicos como los negros de humo y carbonato de calcio.

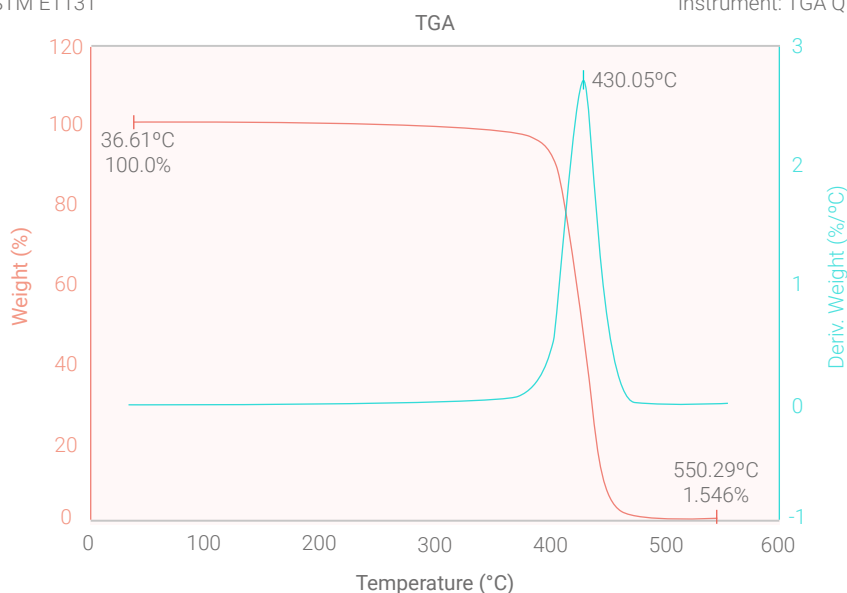
La figura 23 presenta un ejemplo común de una curva de TGA, donde se puede observar un solo cambio claro en el peso de la muestra analizada. Este cambio ocurre entre los 400° y 500° correspondiente al material polimérico que conforma la muestra; y por último un remanente de 1,54 % del peso de la muestra que no se degrada. Este último corresponde a las cargas inorgánicas presentes en la muestra, las cuales pueden ser carbonatos de calcio, fibras de vidrio u otros elementos que soportan estas temperaturas.

Adicionalmente las temperaturas de degradación que se observan en forma de picos en la curva de la derivada son propias de cada material, por lo que sirven de técnica complementaria a un DSC o un TGA para identificar un tipo de material.

Figura 23.
Espectro IR de un polietileno.

Sample: Vasos Ps
Size: 19.1780 mg
Method: ASTM E1131

Operator: ICIP
Run date: 05-may-14
Instrument: TGA Q500 V20.13



Fuente: ICIPC (2020).

5.11 TECNOLOGÍAS DE IDENTIFICACIÓN Y SEPARACIÓN DE PLÁSTICOS A NIVEL INDUSTRIAL

Los procesos de clasificación manuales de los materiales plásticos basados en los métodos introducidos anteriormente suelen tener rendimientos bajos o inconsistentes, por lo cual son una opción solo cuando los volúmenes de material a procesar son relativamente bajos y la calidad del material obtenido no es muy crítica. Sin embargo, si una empresa procesa grandes cantidades de material de forma regular o tiene interés en incrementar su productividad, la incorporación de tecnologías avanzadas de identificación y clasificación puede tener un beneficio económico mayor y sea más atractivo como negocio.

En estos casos existen equipos y tecnologías de clasificación y separación de plásticos a nivel industrial como las que mostraremos a continuación.

5.12 SEPARACIÓN POR DENSIDAD

Como se mencionó anteriormente, el método de separación por densidad puede ser usado a nivel industrial para la selección y clasificación de diferentes tipos de plásticos. Algunos equipos industriales cuentan con la capacidad de separar dos fracciones de material en continuo. Es importante resaltar que estos equipos solo separan dos fracciones a la vez (el material que flota o el que se hunde), por lo que puede ser necesario varios equipos en línea para separar diferentes materiales.

5.13 SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA

Los fenómenos de triboelectrificación se basan en que dos materiales diferentes al ser frotados entre sí intercambian cargas eléctricas a través del área de contacto, quedando una de ellas cargada positivamente y la otra negativamente. Los equipos de separación electrostática de plásticos hacen uso de este fenómeno para lograr la separación de diferentes tipos de plásticos automáticamente (Wu *et al.*, 2013).

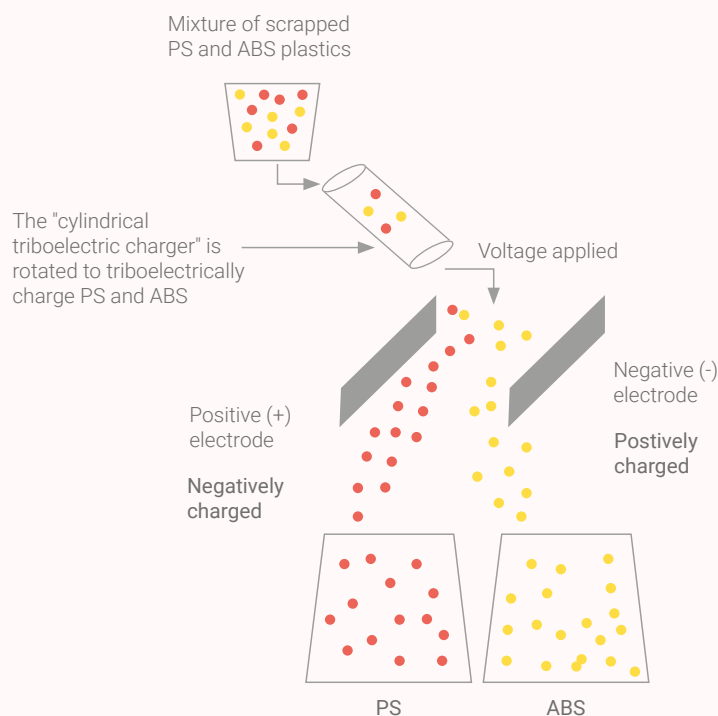
De esta manera se puede hacer una adecuada separación de dos materiales si los componentes de una mezcla adquieren cargas de polaridades opuestas. Una de las secuencias de carga triboeléctricas reportadas es (Dodbiba *et al.*, 2002):

(extremo positivo) ABS-PP-PC-PET-PS-PE-PVC-PTFE (extremo negativo)

Por ejemplo, cuando PE se frota contra PS, el PE se carga negativamente y PS positivamente. Mientras que cuando el PET se frota contra PS, el PET se carga positivamente y el PS negativamente.

Posteriormente los materiales cargados son puestos a campos eléctricos formados por electrodos con campos opuestos (+/-) donde las escamas cargadas positivamente serán repelidas por el electrodo positivo y atraídas por el electrodo negativo, y así se obtiene una separación física de los materiales como se observa en la figura 24 (Dodbiba *et al.*, 2002).

Figura 24.
Esquema de equipo de separación electrostática.



Fuente: Recycling Internacional (2008).



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de la separación triboelectrostática implica (Dodbiba *et al.*, 2002):

1. Carga triboeléctrica de las escamas de plástico trituradas de una mezcla.
2. Transportar la mezcla electrificada a través de un campo electrostático, que separa las partículas individuales de acuerdo con la magnitud y polaridad de las cargas eléctricas, adquiridas durante el proceso de triboelectrificación.

Por lo tanto, en cualquier separación triboelectrostática, es necesario tener un proceso mediante el cual las escamas de material son cargados individualmente por fricción y una fuente de potencial eléctrico para generar el campo eléctrico entre los electrodos para lograr su separación.

Además, la transferencia de carga de electrones desde la superficie ocurre desde una superficie con un potencial eléctrico menor a una con potencial

eléctrico mayor. Por esto, el material de contacto usado es un factor clave en el funcionamiento del sistema y será preferible usar un material con un potencial eléctrico intermedio a los dos materiales que se pretende separar.

Para un adecuado funcionamiento de esta técnica se requieren una entrada de material previamente clasificada o realizar varios ciclos de separación. Es decir, se obtienen los mejores resultados con solo dos tipos de plástico con tamaño de escama homogéneo (2 a 10 mm) (Dodbiba *et al.*, 2003).



EQUIPOS

Estos separadores a menudo pueden procesar desde 650 hasta 3.000 kg de plásticos por hora. La figura 25 muestra un equipo de la empresa Hamos con capacidad de procesar 1.500 kg/h de ABS/PS:

Figura 25.
Separador electrostático de plásticos Hamos.



Fuente: Hamos EKS electrostatic plastic/plastic separators (2021).

En la tabla 24 se presentan las ventajas y las desventajas que posee esta técnica de identificación.

Tabla 24.
Ventajas y desventajas de la separación electrostática.

Ventajas	Desventajas
• Inversión inicial moderada. • Fácil de implementar. • Proceso de separación en seco. • Separa mezclas de materiales complejas (ej. PS/ABS) • Funcionamiento automático. • Alta productividad, más de 1.000 kg de plásticos por hora. • Separación de diferentes materiales independiente de color y densidad de las fases. • Separación de residuos de metales y cable de los plásticos.	✗ Costos de operación importantes debido al consumo de energía. ✗ Tecnología sensible a la humedad y presencia de sales y polvo en los materiales a procesar. ✗ Cuando se combinan métodos de hundimiento y flotación con separación electrostática, no se deben usar sal de mesa (NaCl) ni potasio (KCl) o realizar un lavado adecuado. ✗ Se debe hacer una limpieza y secado adecuado de los materiales previo a la separación por esta técnica. ✗ No separa por colores.

Fuente: ICIPC (2020).

5.14 EQUIPOS AUTOMÁTICOS DE SEPARACIÓN

Las líneas de procesamiento totalmente automatizadas combinan varias tecnologías que permiten la clasificación automática de plásticos por tipo, color y contenido de aditivos.

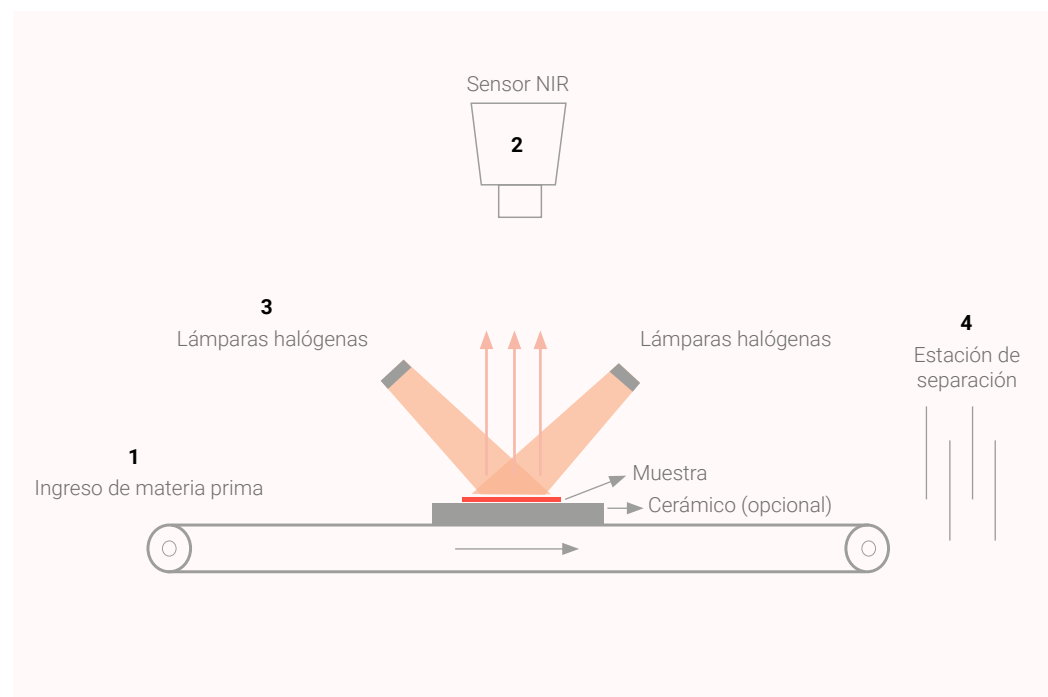


ESPECTROSCOPÍA DE INFRARROJO CERCANO

La tecnología de espectroscopía de infrarrojo cercano o NIR, por sus siglas en inglés, ha presentado un importante desarrollo en la industria del reciclaje del plástico gracias a su capacidad para analizar en línea materiales picados o en escamas. Los separadores que usan la tecnología NIR permiten en cuestión de segundos la identificación y posterior separación de los plásticos mezclados.

La figura 26 muestra de manera esquemática un dispositivo de clasificación por sensor NIR y sus componentes. En esta A representa la entrada de material con banda transportadora; B representa el sensor NIR que capta los espectros de los materiales al pasar. Esta información es enviada a través de fibras ópticas al espectrómetro (D), donde en cuestión de segundos, algoritmos de alta precisión detectan los espectros infrarrojos de cada muestra y se comparan con bibliotecas, lo que permite al sistema determinar qué polímero está pasando por la banda. Al salir de la banda transportadora, una unidad de rechazo (E) emite una inyección de aire localizada para enviar el material a su contenedor específico y separar el material en dos contenedores, pasa o no pasa. Si se desean hacer separaciones de más de dos materiales será necesario utilizar equipos en línea o hacer varios ciclos en un sistema.

Figura 26.
Esquema de equipo
de clasificación de
plásticos por NIR.



Fuente: Chen et al. (2021).

En la tabla 25 se describen las ventajas y las desventajas que posee esta técnica de identificación.

Tabla 25.
Ventajas y
desventajas de la
separación por NIR.

Ventajas	Desventajas
• Proceso de separación en seco. • Separa mezclas de materiales complejas (ej. PS/ABS). • Funcionamiento automático. • Alta productividad. • Separación de diferentes materiales independiente del color y densidad de las fases.	✗ Inversión inicial alta. ✗ Costos de operación importantes debido al consumo de energía. ✗ Solo permite realizar la separación de dos fases en cada ciclo. ✗ No separa por colores.

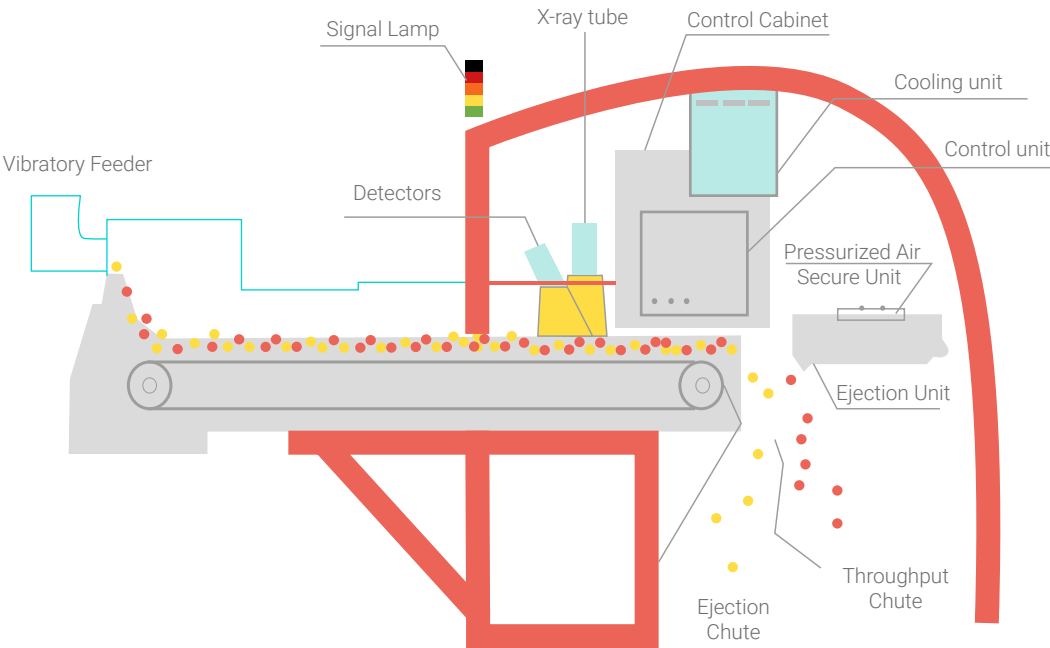
Fuente: ICIPC (2020).



FLUORESCENCIA DE RAYOS X (XRF)

La tecnología XRF separa el material en base a la composición química. Este sistema de clasificación podría eventualmente revolucionar todo el mercado del reciclaje de plásticos. Existe una demanda extraordinariamente alta de una máquina de clasificación capaz de segregar PVC oscuro y plástico bromado de una entrada de plástico triturado.

Figura 27.
Tecnología XRF.



Fuente: Al-Blooshi et al. (2016).

En la tabla 26 se describen las ventajas y las desventajas que posee esta técnica de identificación.

Tabla 26.
Ventajas y desventajas de la separación por XRF.

Ventajas	Desventajas
• Proceso de separación en seco. • Separa mezclas de materiales complejas (ej. PS/ABS). • Funcionamiento automático. • Alta productividad. • Separación de diferentes materiales independiente de color y densidad de las fases. • Permite la identificación y separación de materiales no reciclables mecánicamente contaminados con retardantes de llama bromados.	✗ Inversión inicial alta. ✗ Costos de operación importantes debido al consumo de energía. ✗ Solo permite realizar la separación de dos fases en cada ciclo. ✗ No separa por colores.

Fuente: ICIPC (2020).



EQUIPOS DE SEPARACIÓN POR COLOR

Esta tecnología, que trabaja en el campo de la clasificación de plásticos, está equipada con una cámara RGB.

En la tabla 27 se describen las ventajas y las desventajas que posee esta técnica de identificación.

Tabla 27.
Ventajas y desventajas de la separación por color.

Ventajas	Desventajas
• Proceso de separación en seco. • Funcionamiento automático. • Alta productividad. • Separación de materiales color.	✗ Inversión inicial alta. ✗ Costos de operación importantes debido al consumo de energía. ✗ Solo permite realizar la separación de dos fases en cada ciclo. ✗ No identifica tipos ni familias de materiales.

Fuente: ICIPC (2020).



ESTANDARIZACIÓN
DE MATERIALES PARA
COMERCIALIZACIÓN

La estandarización y el control de calidad de los materiales plásticos recuperados son temas fundamentales para valorizar y potenciar su posibilidad de uso en productos industriales. Solo a través de la innovación tecnológica en el proceso de reciclaje y de la definición de estándares de calidad específicos es posible garantizar la calidad de los productos plásticos reciclados.

Por esto, actualmente la demanda de plástico reciclado para aplicaciones industriales es baja, principalmente en productos de alto valor agregado, y se limita principalmente a aplicaciones de bajo valor agregado. La mayoría de las marcas y empresas de transformación de plástico desconfían de la posibilidad de incorporar en sus procesos plásticos reciclados, pues temen no poder garantizar sus especificaciones de producto final o no contar con un abastecimiento constante de material confiable.

Uno de los aspectos más débiles dentro de la industria del reciclaje en Colombia es el control de calidad sobre los materiales recuperados, esto hace que de lote a lote el desempeño cambie, o tenga variaciones tan grandes que hagan que el valor del material sea bajo.

La industria de transformación de materiales plásticos es altamente tecnificada, por lo que la productividad y eficiencia juega un papel preponderante, por lo tanto, los materiales a incorporar deben estar a la altura de las exigencias del proceso independiente si la fuente es reciclada o no, de lo contrario será relegado a aplicaciones de menor valor en donde las exigencias son bajas.

Para los materiales reciclados se recomiendan diferentes niveles de control de calidad, dependiendo del mercado y el valor potencial del material, tal como se presenta a continuación.

6.1 CONTROLES BÁSICOS DE CALIDAD

Como controles básicos de la calidad de un sistema de reciclaje se tienen las siguientes pruebas:

- Color.
- Densidad de empaque o densidad aparente.
- Densidad del material.
- Índice de fluidez.

Los controles básicos de calidad permiten asegurar un tamaño y forma de pélet consistente, así como identificar posibles variaciones en el desempeño a través del MFI o alteraciones en el color para aquellos productos en los cuales es una característica por controlar.

En cuanto al color, dada la subjetividad que se puede asociar al control visual, se sugiere inicialmente definir parámetros o estándares de tono mínimo y máximo permitido. Más adelante podrá considerarse el uso de un colorímetro para cuantificar las variaciones y estandarizar aún más el color si es pertinente.

6.2 CONTROLES INTERMEDIOS DE CALIDAD

- Propiedades en tensión y elongación.
- Propiedades de impacto.
- Calcinación y cenizas.

6.3 CONTROLES AVANZADOS DE CALIDAD

- Calorimetría diferencial de barrido (DSC).
- Espectrofotometría infrarroja.
- Cromatografía de gases.

6.4 FICHA TÉCNICA Y CERTIFICADO DE CALIDAD POR LOTES

Lo primero que debe tenerse en cuenta es la diferencia entre una ficha técnica y un certificado de calidad tal como se aprecia en la figura 28.

Figura 28.

Diferencias entre una ficha técnica y un certificado de calidad por lotes.



Fuente: ICIPC (2020).

El primer paso es construir una ficha técnica, teniendo una base de datos suficiente que permita estimar la variación de las propiedades. El siguiente paso es realizar un control lote a lote que permita establecer si cumplen con los criterios e históricos previamente definidos.

Una ficha técnica facilita identificar o seleccionar adecuadamente un material, toda la información técnica contenida en una ficha debe estar acompañada de la norma usada para la caracterización y las unidades específicas, como se muestra en la figura 29.

Figura 29.
Ejemplo ficha técnica.

FICHA TÉCNICA PRELIMINAR CÓDIGO DEL MATERIAL

MATERIAL: Proveedor -Tipo de material - Color

Descripción General:

Compuesto polimérico proveniente de RAEE, seleccionado de fuentes controladas principalmente neveras con contenido mayoritario de poliestireno de alto impacto (HIPS), y libre de retardantes de llama bromados de color blanco.

Por sus características de fluidez es adecuado para los procesos de intección para ser usado puro o en combinación con PS o HIPS virgen.

Usos:

Piezas inyectaadas plásticas de larga vida útil.

Posibilidad de modificar sus propiedades y ajustarlas dependiendo de la aplicación.

Beneficios:

Reducción del impacto ambiental.

Propiedades

Nota:

Los valores presentados son típicos y no pretenden que sean usados para especificar productos.

PROPIEDAD	NORMA	UNIDADES	VALOR
Módulo secante	ASTM D638	MPa	2300
Resistencia a la tensión	ASTM D638	MPa	30
Elongación en la fractura	ASTM 638	%	25
Índice de fluidez -MFI	ASTM D1238	g/10 min 230°C/3.8 Kg	20
Resistencia al impacto	ASTM D256	kJ/m3	11
Densidad	ASTM D792	g/cm3	1,05
Cenizas en mufla	interna	%	<2,5

Para su procesamiento se recomienda usar temperaturas entre 200°C - 210°C

Debido a la naturaleza de la fuente no se recomienda su uso para plásticos en contacto con alimentos.

Fuente: ICIPC (2020).

Entre la información básica que debe contener una ficha técnica se encuentra:

- **Referencia:** nombre del material que identifique inequívocamente una referencia específica.
- **Descripción:** descripción general del material, en el caso de los materiales reciclados es importante indicar el tipo de fuente del que proviene el material.
- **Características:** información con características particulares del material, ej. color, presencia de cargas, entre otros.
- **Usos:** información con los usos recomendados para un material, ej. partes automotrices, empaques, contenedores, entre otros.
- **Propiedades físicas:** propiedades del material como densidad, presencia y contenido de cargas, índice de fluidez (MFR o MFI), entre otros.
- **Propiedades mecánicas:** entre las propiedades mecánicas contenidas usualmente en una ficha técnica se encuentran las propiedades en tensión y flexión con sus resistencias y módulos, propiedades de resistencia al impacto y la dureza del material.
- **Propiedades térmicas:** entre las propiedades térmicas contenidas usualmente en una ficha técnica se encuentran la temperatura de ablandamiento o de fusión.
- **Recomendaciones de procesamiento:** una ficha técnica usualmente contiene recomendaciones básicas de las condiciones de procesamiento de un material como la temperatura y requerimientos de acondicionamiento. Sin embargo, suelen existir fichas complementarias como las fichas de procesamiento que contienen esta información.
- **Otras propiedades:** dependiendo del material que se está ofertando y sus aplicaciones potenciales, existen otras propiedades que pueden ser incluidas en la ficha como propiedades ópticas, resistencia a químicos, entre otros.

- **Presentación:** es importante incluir en una ficha técnica la presentación comercial de un material, incluyendo su forma (pélets, escamas o polvo), color y cantidad regular (bulto de 25 kg, *big bag*), entre otros.

Una ficha técnica se elabora una sola vez, y dependiendo de los cambios en el proceso se actualiza, por lo que no es común estar realizando cambios a la misma.

El certificado de calidad por lotes es usado para certificar las propiedades del material obtenidas en una cantidad específica de material producido o lote. Las propiedades reportadas en un certificado dependerán tanto de la infraestructura del laboratorio que tenga la empresa productora del material reciclado, como de los parámetros más importantes para el cliente. Un ejemplo de un certificado por lotes se muestra en la figura 30.

Dentro de la información básica que debe contener un certificado de calidad por lote se encuentra:

- **Cliente:** quien va a utilizar el material para transformarlo en producto final.
- **Fecha expedición:** fecha en que se genera el documento.
- **Número de lote:** identificación interna del lote según lo indique la empresa productora del material.
- **Cantidad:** cantidad en kilogramos del lote que de material que se produjo.
- **Familia y referencia de material:** familia del material, por ejemplo, ABS, PP, PE, HDPE, etc. La referencia es la que la empresa productora del material tiene asignada.
- **Presentación del material:** especificar si el material viene peletizado, molido, aglomerado, etc.

Figura 30.
Ejemplo de certificado
por lotes.

CERTIFICADO DE CALIDAD POR LOTE

Cliente: _____

Fecha expedición: _____

#LOTE: _____

Cantidad: _____

Tipo y referencia de material: _____

Presentación del material: _____

PROPIEDAD	NORMA	UNIDADES	LÍMITES	VALOR
Índice de fluidez -MFI	ASTM D1238	g/10 min 230°C/3,8 kg	20±2	20
Densidad de empaque	DIN 43468	g/cm ³	0,8±2	0,7
Cenizas en mufla	interna	%	<5	<2,5

Responsable: _____

Fuente: ICIPC (2020).



SECTORES DE INTERÉS PARA
MATERIALES RECUPERADOS

El mercado potencial de los materiales reciclados depende en gran medida de sus propiedades químicas y mecánicas, lo que define sus posibles aplicaciones y, por ende, su precio. Las tecnologías de reciclaje mejoran (*upgrading*) o desmejoran (*downgrading*) la calidad del material con respecto al material virgen (Cobo *et al.* 2018).

Un ejemplo de reciclaje *downgrading* es la mezcla de polímeros incompatibles sin ninguna funcionalización o compatibilización, utilizados para hacer vaciados y obtener partes plásticas de grandes espesores, como postes, tablones, etc., que son usados para hacer amueblamiento, componentes de parques, etc. Debido a las bajas propiedades del material resultante, estas piezas son fabricadas de grandes espesores para poder asegurar una rigidez mínima, con lo cual el material pierde valor.

Por otro lado, el reciclaje “botella a botella” del PET es un ejemplo de reciclaje *upgrading* debido a que el material se somete a un proceso de ultralimpieza y poscondensado, en el cual mejora su peso molecular y, por lo tanto, sus prestaciones químicas y mecánicas (Forrest, 2019).

Adicionalmente, existen procesos de reciclado de bucle cerrado y bucle abierto. En el reciclaje de bucle cerrado, el material es usado y recuperado para la misma aplicación o aplicaciones similares (Organización Internacional de Normalización, 2006). Lo anterior no quiere decir que el material pueda ser reciclado indefinidamente, debido a los cambios microestructurales que sufre por la acumulación de elementos contaminantes y los procesos de degradación en cada uno de sus reusos (Gaustad *et al.*, 2011). Entre tanto, en el reciclaje abierto, el material termina siendo utilizado en una aplicación totalmente diferente a la de su ciclo anterior. El reciclaje abierto puede perder trazabilidad y valor del material, por lo cual el número de reusos puede ser significativamente disminuido.

Un ejemplo de reciclaje de bucle cerrado es cuando se toma una botella de vidrio y se genera con este material una jarra, debido a que la funcionalidad es la misma (Haupt *et al.*, 2017), mientras que reciclar botellas de PET para obtener fibras de PET es un ejemplo de reciclaje de ciclo abierto (Shen *et al.*, 2010).

A su vez, los procesos de reciclado pueden clasificarse como *downcycling* y *upcycling*. Se habla de *downcycling* cuando el material reciclado es usado para obtener productos de menor valor (Gaustad *et al.*, 2012). Un ejemplo de *downcycling* es la utilización de material de empaque que era grado alimentario para producir elementos como palos de escoba, reglas escolares, etc. Se habla de *upcycling* cuando el producto reciclado es de mayor valor que el producto original (Pol, 2010). En estos casos, normalmente se incluyen cambios físicos en la estructura o cambios en la composición química. La figura 31 resume los tipos de tecnologías de reciclado. El cuadro rojo y naranja corresponde a la gran percepción que se tiene sobre los materiales reciclados, donde se obtienen productos de mala calidad con materias primas de bajas prestaciones. El cuadro azul corresponde al caso más cercano de economía circular, en donde el material es reutilizado varias veces para generar el mismo producto, que es el caso botella a botella del PET. Finalmente, el cuadro verde es la obtención de productos de mayor valor agregado al mejorar el desempeño del material reciclado.

Figura 31.

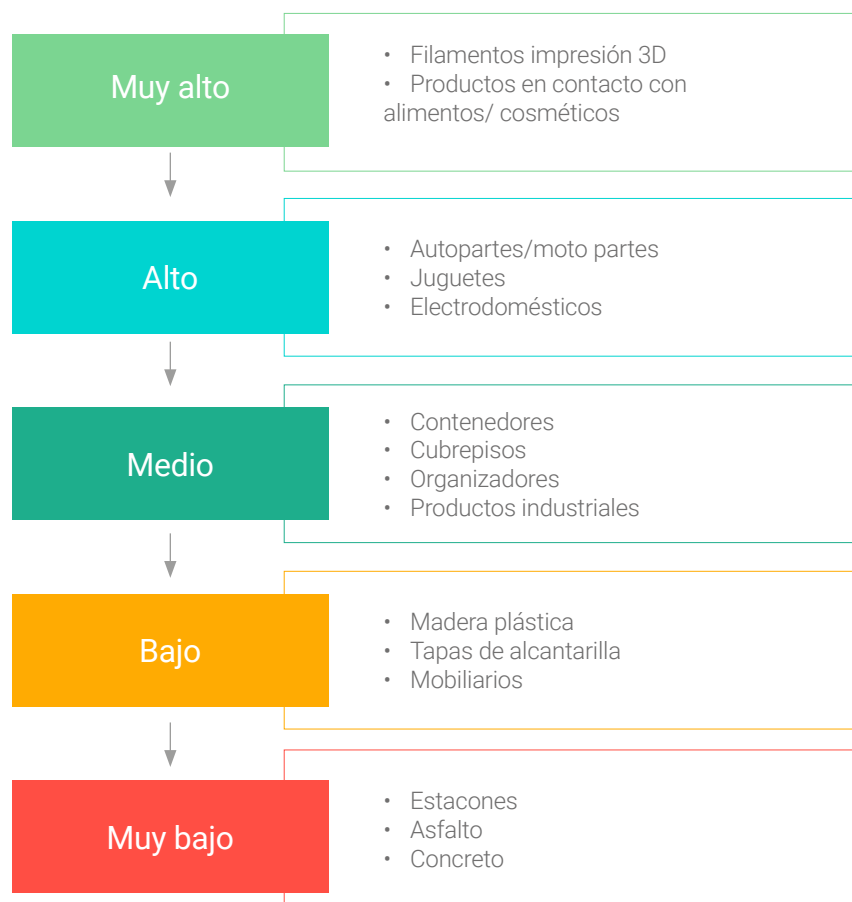
Resumen gráfico de conceptos *upgrading* / *upcycling* *upgrading* y *upcycling*.

Calidad del material reciclado vs material original	Mejor (<i>Upgrading</i>)			BUCLE ABIERTO
	Igual (<i>Upgrading</i>)	BUCLE ABIERTO	BUCLE CERRADO	
	Peor (<i>Upgrading</i>)	BUCLE ABIERTO		
		Menor (<i>Downcycling</i>)	Igual (<i>Downcycling</i>)	Mayor (<i>Downcycling</i>)
		Valor del nuevo producto respecto al original		

Fuente: ICIPC (2021).

De manera general, el valor relativo del material recuperado es acorde a la aplicación objetivo (figura 32). De esta manera, es posible definir sectores de muy alto valor agregado como los empaques de alimento y cosméticos, los cuales requieren altos estándares de calidad y en algunos casos aprobación por la FDA. Otro ejemplo es la fabricación de filamentos para impresión 3D que requiere materias primas de excelente calidad. Por otro lado, existen aplicaciones de alto potencial de aprovechamiento de materiales reciclados con valores interesantes en la industria, como es el caso de algunas autopartes o juguetes para niños o incluso canastas de botellas y productos industriales. Por último, los materiales de menor calidad, pero aún aprovechables, pueden ser direccionados a aplicaciones de menor valor agregado, al permitir su ingreso dentro de los conceptos de economía circular y evitar que estos materiales lleguen a lugares indebidos como vertederos y rellenos sanitarios.

Figura 32.
Valor relativo a la aplicación de los materiales.



Fuente: ICIPC (2021).

Los conceptos presentados aplican de igual manera con los plásticos provenientes de los RAEE y VFVU. Se identifican algunos mercados potenciales para las resinas provenientes de la recuperación de RAEE y UDV, las cuales se presentan en la tabla 28.

Tabla 28.

Potencial para las resinas recuperadas por sector industrial.

Sector	Material
Hogar	PP
	PE
Electrodomésticos	PP
	PE
	PS
	ABS
Automotriz	PP
	PE
	ABS
Sector cosmético	ABS
	PS
Productos de consumo	PP
	PE
	ABS
	PS
Juguetes	ABS
	PP
	PE
Sector industrial y construcción	PVC
	PP
	PE

Fuente: ICIPC (2021).



ADITIVOS USADOS EN
LA INDUSTRIA PLÁSTICA
Y EL RECICLAJE

Los aditivos son materiales que se mezclan con los polímeros para modificar o ajustar las propiedades físicas o químicas del material y dar cumplimiento a las especificaciones o necesidades requeridas en su aplicación (Murphy, 2014).

Existe una gran variedad de aditivos, tales como modificadores de impacto, compatibilizantes, pigmentos, espumantes, ayudantes de proceso y rellenos, con los cuales se puede modificar tanto el proceso como las características y propiedades del producto final (Hahladakis *et al.*, 2018).

A continuación se describen algunos de los aditivos más usados en la industria del reciclaje plástico.

8.1 PLASTIFICANTES

Los plastificantes mejoran la flexibilidad y durabilidad de los plásticos a la vez que reducen su viscosidad, lo que facilita en algunos casos su procesabilidad. Los plastificantes son esencialmente disolventes no volátiles. Los plastificantes más comunes son los ésteres de ácido ftálico trimelítico, benzoico y adípico. Estos compuestos de bajo peso molecular funcionan como espaciadores entre las cadenas de polímero y reducen la barrera de energía rotacional, así mejora la flexibilidad del plástico. Los plastificantes también reducen la temperatura de procesamiento y cambian muchas otras propiedades físicas y mecánicas. Por ejemplo, reducen la temperatura de transición vítrea, el módulo de Young y la viscosidad de la masa fundida (Bart, 2005).



8.2

LUBRICANTES Y PROMOTORES DE FLUJO

Estos al igual que algunos plastificantes son aditivos que mejoran la procesabilidad de la resina y previenen daños al equipo de moldeo al reducir la fricción (lubricantes externos) y al disminuir la viscosidad (lubricantes internos) (Special Chem, s. f.c). Los lubricantes externos típicos son:

- Jabones metálicos.
- Ácidos grasos.
- Parafina.
- Polietileno de bajo peso molecular.

Estos compuestos migran a la interfaz entre la resina fundida y la superficie metálica del equipo de procesamiento para así reducir la fricción.

Los lubricantes internos promueven el flujo de la resina y facilitan el llenado de los moldes en los procesos de inyección de plásticos. Los lubricantes internos comunes son:

- Ésteres grasos.
- Ceras EVA.
- Óxidos de polietileno.

Una tercera clase de aditivos de procesamiento son los agentes de desmoldeo, que evitan que el producto plástico se adhiera al molde y ayudan a disminuir imperfecciones de la superficie. Los aceites de silicona, grafito, estearato de zinc y disulfuro de molibdeno se utilizan a menudo para este propósito si los lubricantes mencionados anteriormente permiten un desmoldeo adecuado.

8.3

ANTIOXIDANTES Y ESTABILIZADORES

Los antioxidantes son usados para inhibir la degradación causada por las condiciones termomecánicas o termooxidativas, producto del procesamiento y uso de los plásticos prolongando la vida de los productos, mejorando su apariencia y manteniendo su fuerza, rigidez o flexibilidad. La forma en que los antioxidantes inhiben el proceso de degradación varía según su clase. Las dos clases principales de antioxidantes son captadores de radicales libres y captadores de peróxido. Los captadores de radicales libres son conocidos como antioxidantes primarios, mientras que los captadores de peróxido son los antioxidantes secundarios (Murphy, 2014; Hahladakis *et al.*, 2018).

Los antioxidantes primarios más utilizados son los fenoles impedidos estéricamente y los antioxidantes secundarios más comunes son los compuestos de fósforo trivalente (fosfitos). A menudo se utilizan en combinación para lograr efectos de inhibición sinérgicos. Otros estabilizadores importantes son los estabilizadores de luz de amina impedida (HALS) y los absorbentes de luz UV, que son inhibidores eficaces contra la degradación inducida por radicales libres o UV durante el servicio (Bart, 2005).

8.4

MATERIALES DE RELLENO Y CARGAS

Los rellenos suelen ser materiales inorgánicos, inertes y económicos usados principalmente para agregar volumen a los plásticos y, de esta manera, reducir el consumo de resina. Sin embargo, existen otros beneficios de los rellenos minerales; por ejemplo, pueden mejorar la moldeabilidad y estabilidad de las resinas (Bart, 2005). Además, aumentan la temperatura de deflexión térmica (HDT) y reducen la expansión térmica de los productos terminados.

Los minerales utilizados más comunes como cargas incluyen carbonato de calcio, talco, sílice, arcilla, mica, caolín, sulfato de calcio, fibras de vidrio, perlas de vidrio, negro de humo, trihidrato de alúmina y wollastonita.

8.5

RETARDANTES DE LLAMA

Los retardantes de llama son aditivos que reducen o ralentizan la inflamabilidad de los plásticos. Estos pueden ser divididos en compuestos orgánicos e inorgánicos. Los retardadores de llama inorgánicos más comunes son (Special Chem, s. f.c).

- Hidróxido de aluminio (también conocido como trihidrato de aluminio o ATH).
- Hidróxido de magnesio.
- Borato de zinc.
- Óxidos de antimonio.
- Hidromagnesita (mineral de carbonato de magnesio hidratado).

Los retardadores de llama orgánicos más comunes son:

- Compuestos clorados.
- Compuestos bromados.
- Organofosforados.
- Organofosfonatos.

La eficacia de estos retardantes aumenta con el contenido de halógeno que puede llegar hasta el 80 % en peso de halógeno.

8.6 ELIMINADORES O ATRAPADORES DE OLORES

Algunos materiales reciclados dan lugar a olores desagradables e intolerables durante el procesamiento y en las aplicaciones posteriores. Estos olores se pueden generar por la degradación causada en su procesamiento y uso o por contenido de contaminantes que, incluso en trazas, pueden genera estos olores (Murphy, 2014).

Para enmascarar, mitigar o eliminar estos olores no deseados existen varios tipos de aditivos. Los absorbentes de olores, como las zeolitas, pueden atrapar las moléculas dentro de su estructura molecular tipo jaula.

Los aditivos reactivos proporcionan un efecto más duradero, ya que entran en reacción química con los grupos funcionales de los compuestos responsables del olor (a menudo componentes sulfurosos o aminas) y los convierten en compuestos no volátiles eliminando su olor. Generalmente, todos los compuestos reactivos pueden contribuir a minimizar el olor.

8.7 MODIFICADORES DE IMPACTO

Los modificadores son usados para mejorar la capacidad de absorción de impacto de los materiales frágiles o también permite recuperar la resistencia de los materiales reciclados que han perdido propiedades por efectos del procesamiento o uso previo (Bart, 2005). Los modificadores de impacto comunes son elastómeros funcionalizados como caucho de butadieno y acrílicos reticulados; copolímeros de bloque tales como SBS, NBR y EPDM (Murphy, 2014; Special Chem, s. f.c).

8.8 RETICULANTES

Algunos materiales reciclados dan lugar a olores desagradables e intolerables durante el procesamiento y en las aplicaciones posteriores. Estos olores se pueden generar por la degradación causada en su procesamiento y uso o por contenido de contaminantes que, incluso en trazas, pueden genera estos olores (Murphy, 2014).

Para enmascarar, mitigar o eliminar estos olores no deseados existen varios tipos de aditivos. Los absorbentes de olores, como las zeolitas, pueden atrapar las moléculas dentro de su estructura molecular tipo jaula.

Los aditivos reactivos proporcionan un efecto más duradero, ya que entran en reacción química con los grupos funcionales de los compuestos responsables del olor (a menudo componentes sulfurosos o aminas) y los convierten en compuestos no volátiles eliminando su olor. Generalmente, todos los compuestos reactivos pueden contribuir a minimizar el olor.

8.9 COMPATIBILIZANTES Y AGENTES DE ACOPLA

En la industria de reciclaje y recuperación de plástico, la compatibilidad entre los diferentes polímeros es un aspecto clave, ya que un proceso de recuperación de un material específico puede ser afectado de gran manera por la presencia de pequeñas cantidades de un material incompatible (Nechifor et al., 2018). La mayoría de las resinas poliméricas tienen baja energía libre de superficie o carecen de grupos funcionales polares, lo que da como resultado propiedades de adhesión inherentemente pobres. Por tanto, para mejorar la adherencia de los polímeros con otros componentes, ya sean cargas o incluso otros polímeros, se añaden promotores de adherencia.

En la literatura se pueden encontrar tablas como la presentada en la figura 33 (NE.Mold, s. f.), las cuales indican de manera cualitativa la compatibilidad de dos materiales con base en pruebas experimentales y en el conocimiento de los materiales.

Figura 33.
Tabla de compatibilidad entre polímeros.

- Convenciones**
- Excelente adhesión
 - Buena adhesión
 - Adhesión media
 - Pobre adhesión
 - Sin datos disponibles

Material	ABS	ASA	CA	PA 6	PA 6.6	Mezcla de PA	PBT	PC	PC/ABS	PC/PBT	PC/PET	PE	PET	PMMA	POM	PP	PPO	PS	SAN	TPE	TPU	LSR
ABS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ASA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PA 6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PA 6.6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Mezcla de PA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PBT	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PC	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PC/ABS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PC/PBT	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PC/PET	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PE	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PET	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PMMA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
POM	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PP	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PPO	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SAN	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
TPE	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
TPU	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
LSR	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Fuente: NE.Mold (s. f.).

En los casos donde no se presenta una adecuada compatibilidad o adhesión entre diferentes polímeros existen aditivos denominados compatibilizantes o agentes de acople que generan cambios y reacciones en las estructuras químicas y propiedades de los materiales, lo cual incrementa la adhesión o compatibilidad de dos componentes inmiscibles (Special Chem, s. f.a).

Según el modo de acción, los promotores de adhesión son de dos tipos:

- **Compatibilizantes:** cuando se utilizan promotores de adhesión para aumentar la compatibilidad de dos resinas poliméricas inmiscibles.
- **Agentes de acople:** cuando se utilizan promotores de adhesión para aumentar la adhesión entre una resina polimérica y un relleno.

Adicionalmente, estos agentes pueden ser reactivos o no reactivos. Dependerá de si contienen un grupo funcional que pueda reaccionar con los sustratos a los que se puedan adherir o no. La tabla 29 presenta las características principales de los tipos de agentes de acople y compatibilizantes:

Tabla 29.

Características principales de los tipos de agentes de acople y compatibilizantes.

Agentes de acople y compatibilizantes	
Reactivos	No reactivos
• Los agentes contienen grupos reactivos. • Interactúan químicamente con los componentes de la mezcla, formando enlaces covalentes y, de esta manera, reducen o eliminan el efecto repelente de los componentes de la mezcla. • Los grupos reactivos pueden ser grupos de ácido carboxílico, grupos epoxi (por ejemplo, metacrilato de glicidilo o oxazolina), anhídrido maleico u otros.	• Los agentes no reactivos obtienen su funcionalidad principalmente de su polaridad otorgada por un comonomero. • Representan una polaridad intermedia entre los 2 componentes de una mezcla o entre sustratos adheridos y la adhesión se genera por fuerzas de Van der Waals entre los componentes. • Los agentes no reactivos son copolímeros de etileno y acrilatos (EMA, EEA, EBA) o terpolímeros que también contienen monóxido de carbono (CO) o acetato de vinilo (VA).

Fuente: Special Chem (s. f.a).

8.10 COMPATIBILIZACIÓN DE POLÍMEROS INCOMPATIBLES

El objetivo principal de la compatibilización entre diferentes polímeros es reducir la energía interfacial entre las dos matrices y así aumentar la adhesión al igual que la dispersión de una matriz en la otra. De esta manera se mejora el desempeño mecánico del material obtenido y, adicionalmente, al mejorar la compatibilidad se logran dispersiones más finas, morfologías más regulares y estables, por lo que se mejora el aspecto superficial de los productos fabricados (Gaylord, 1989; Koning *et al.*, 1998).

Dentro de los compatibilizantes se pueden diferenciar 3 categorías:

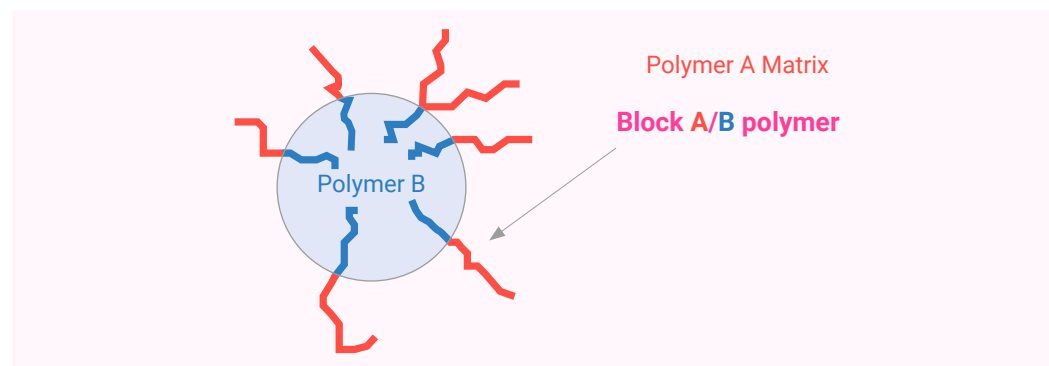
- Copolímeros de bloque (no reactivos).
- Copolímeros funcionales reactivos (formación in situ de copolímero de bloque).
- Copolímeros polares no reactivos (interacción específica por polaridad).



COMPATIBILIZACIÓN POR COPOLÍMEROS DE BLOQUE (NO REACTIVOS)

El principio de compatibilización mediante copolímeros en bloque o injertados se muestra en la figura 34. El agente compatibilizante actúa como un “tensioactivo” el cual migra a la interfaz para reducir la tensión superficial. Los bloques rojos son compatibles con el polímero A (matriz) y los bloques azules son compatibles con el polímero B (fase dispersa). Como resultado se obtiene una mejor adhesión interfacial y una mejor dispersión de la fase dispersa en la matriz.

Figura 34.
Principio de compatibilización por copolímero en bloque.



Fuente: Special Chem (s. f.a).

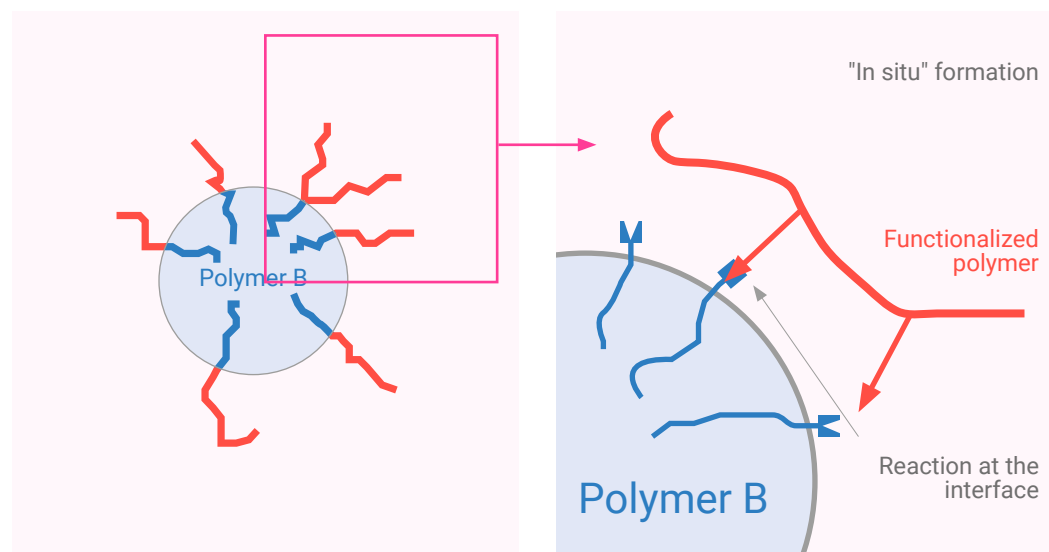


COMPATIBILIZACIÓN POR COPOLÍMEROS FUNCIONALES REACTIVOS

El principio de acción de estos agentes es reaccionar en la interfaz para crear in situ un copolímero de bloque injertado por reacción entre grupos funcionales de los diferentes polímeros. El copolímero funcionalizado es miscible con la matriz y puede reaccionar con grupos funcionales de la fase dispersa (Murphy, 2014).

Figura 35.

Principio de acción por grupos funcionales reactivos.



Fuente: SpecialChem (2021).

Entre las ventajas de este tipo de agentes se encuentra que su reactividad es ajustable, cuentan con una alta eficiencia y comercialmente son más económicos que los copolímeros en bloque.

Entre los compatibilizantes reactivos se encuentran:

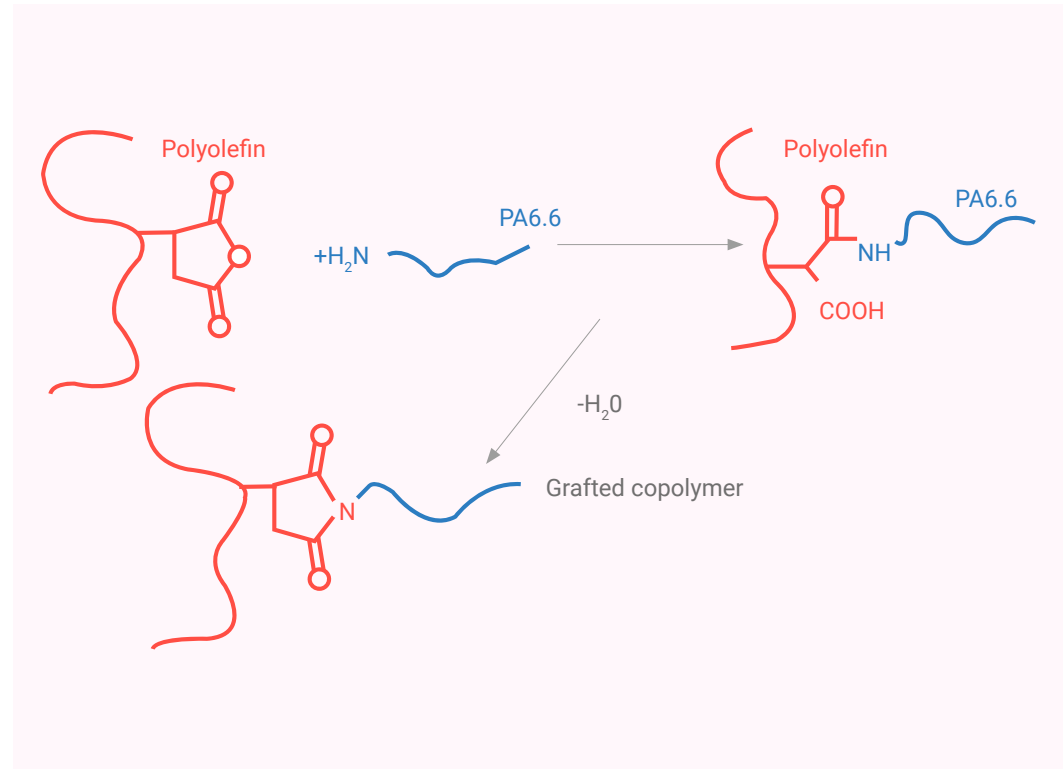
Polímeros maleicos

Los polímeros maleicos se encuentran entre la familia más amplia conocida de polímeros funcionalizados utilizados como compatibilizantes y promotores de la adhesión. Estos polímeros se pueden preparar directamente mediante polimerización o extrusión reactiva, donde el monómero reactivo es generalmente el anhídrido maleico (Special Chem, s. f.a).

Los grupos anhídrido pueden reaccionar con grupos amina, grupos epoxi y, eventualmente, con grupos alcohol. La figura 36 muestra el ejemplo de reacción entre un polímero maleado y grupos terminales -NH_2 de poliamidas o nailon 6,6 para compatibilizar mezclas de PA / poliolefina.

Figura 36.

Polímeros maleados.



Fuente: SpecialChem (2021).

Las resinas maleadas también se utilizan para:

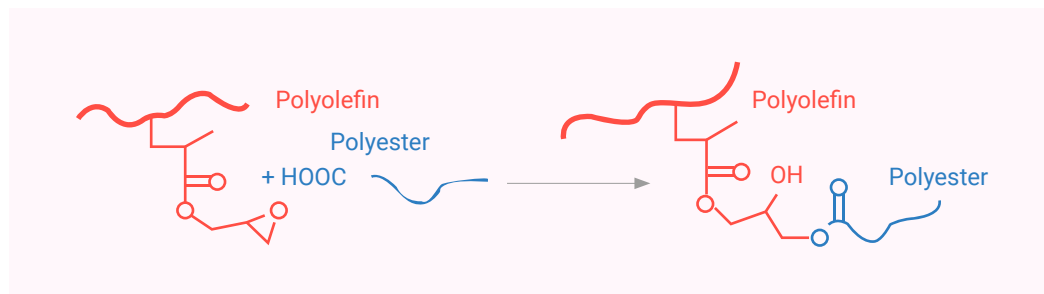
- Incrementar la adherencia de los plásticos al metal.
- Mejorar la cohesión entre un polímero y cargas (ej. ATH, madera o cargas orgánicas).
- Mejorar la adhesión entre el polímero y la fibra de vidrio en termoplásticos y compuestos.
- Modificación de impacto.

Polímeros epoxidados

Estos son polímeros modificados principalmente por metacrilato de glicidilo. Son muy reactivos con grupos NH_2 , anhídrido, ácido y alcohol. Se recomiendan para compatibilizar poliésteres (PET, PBT) y polímeros olefínicos o elastómeros según el mecanismo que se muestra en la figura 37 (Special Chem, s. f.a).

Figura 37.

Polímeros epoxidados.



Fuente: SpecialChem (2021).

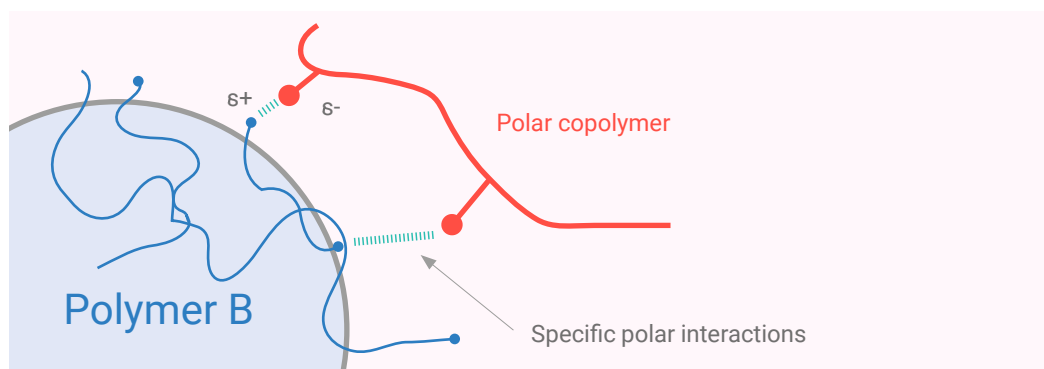


COMPATIBILIZACIÓN POR COPOLÍMEROS POLARES NO REACTIVOS

En la compatibilización con estos agentes se busca reducir la tensión interfacial y aumentar la adhesión mediante la generación de una interacción polar específica como enlaces de hidrógeno o fuerzas de Van der Waals, como se observa en la figura 38 (Special Chem, s. f.a). En estos casos el compatibilizador debe ser compatible con una de las fases (generalmente no polar) y debe generar interacciones específicas con la otra fase.

Figura 38.

Compatibilización por copolímeros polares no reactivos.



Fuente: SpecialChem (2021).

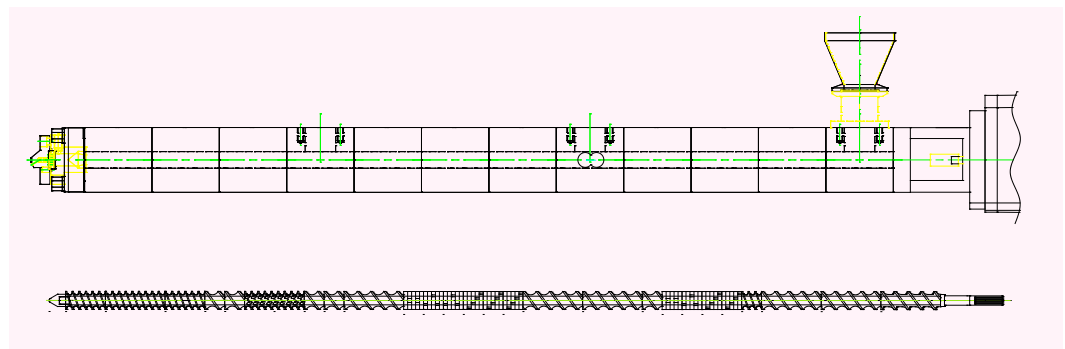
8.11 FORMULACIÓN Y COMPOUNDING DE PLÁSTICOS

La formulación es la selección de las diferentes materias primas, aditivos, sus cantidades y, eventualmente, el tiempo y secuencia de mezcla requeridas para la elaboración de un compuesto con propiedades específicas para el producto o uso final deseado (Ritchie, 2020).

El *compounding* es el proceso de tomar material plástico virgen y modificarlo con varios aditivos según una formulación para obtener características o propiedades específicas de color, propiedades y rendimiento. Una vez mezclados los materiales se obtiene una materia prima con propiedades definidas o un *masterbatch*, el cual comprende un paquete de aditivos y se usa para ser mezclado posteriormente de manera física con otros materiales vírgenes y otorgarles propiedades o características específicas según la formulación.

El *compounding* generalmente se realiza en extrusoras doble husillo como la presentada en la figura 39, el proceso inicia con la alimentación de la materia o materias primas a través del alimentador principal. Una vez en la extrusora, el material es plastificado y mezclado por los tornillos. Los aditivos pueden ser alimentados a través del alimentador principal o de los alimentadores auxiliares dependiendo de los requerimientos. Una vez que el material está completamente homogeneizado, el plástico fundido pasa a través del cabezal para formar hebras de plástico, que luego pasan por un baño de agua para enfriarse y finalmente son alimentados a una peletizadora para obtener el producto final.

Figura 39.
Extrusora doble
husillo modular.



Fuente: ICIPC (2019).

Luego del peletizado, se toman muestras que son analizadas para verificar que el producto obtenido cumpla con la formulación y especificaciones definidas inicialmente.

8.12 EXTRUSIÓN REACTIVA

La extrusión reactiva es un método que combina los procesos químicos tradicionalmente separados (síntesis o modificación de polímeros) y la extrusión (plastificación, mezcla, y conformación) en un único proceso realizado en una extrusora (Hopmann *et al.*, 2017). De esta manera es posible mejorar el desempeño de los plásticos y obtener nuevos productos fabricados a medida gracias a la mejora de la interacción entre los plásticos y los aditivos o cargas incorporados.

En este proceso se usan normalmente extrusoras doble husillo como la presentada en la figura 39. El proceso inicia con la alimentación de los reactivos o las resinas por la tolva principal, donde los reactivos se calientan para iniciar la reacción química. Adicionalmente, es posible introducir aditivos sólidos, líquidos o gaseosos a través de los alimentadores auxiliares de la extrusora. Los componentes de bajo peso molecular, subproductos de reacción y la humedad se pueden eliminar mediante desgasificación por vacío durante el proceso de extrusión reactiva. Finalmente, el material, al igual que en el proceso de extrusión convencional, es pasado a través de un cabezal y peletizado. Las propiedades del producto obtenido dependerán de diferentes factores como la configuración de los husillos, longitud, temperaturas, presencia de aditivos, entre otros.

Entre los diferentes tipos de reacciones que son posibles obtener por este método se encuentran la poliadición, policondensación, la copolimerización por radicales libres, grafting, polimerización iónica y aniónica y la hidrólisis. La tabla 30 muestra algunos de los productos obtenidos por estos tipos de reacciones.

Tabla 30.
Tipos de extrusión reactiva y productos.

Tipo de reacción	Reactivos	Productos
Poliadición	Poliol + diisocianato + diamina aromática	Poliuretano
Policondensación	Precondensado de tereftalato de bisdihidroxibutilo	Tereftalato de polietileno
Copolimeración de Radical libre	Prepolímero de estireno + acrilonitrilo	SAN
Grafting	Poliestireno + acrilonitrilo	Aducto de poliestireno anhídrido maleico Poliamida 6
Polomeración ionica	Caprolactama	Poliamida 6
Copolimeración anionica	1,3-dieno + compuesto de vinilo aromático	Copolímeros de bloque de 1,3-dieno y compuestos vinílicos aromáticos
Hidrolisis	Chatarra de poliuterano	Poliol, aminas

Fuente: ICIPC (2021).



REGLAMENTACIONES PARA
EL USO DE MATERIALES
RECUPERADOS

Cuando se habla de materiales plásticos y sus reglamentaciones, debe identificarse su relación con la aplicación específica, es decir, que no tiene los mismos requerimientos una pieza automotriz, que una pieza electrónica o un empaque para alimentos, así estén fabricados con el mismo polímero.

Por esto, antes de abordar una aplicación con material reciclado, es importante tener en cuenta las normas o reglamentaciones que aplican en su segmento de mercado. A continuación, se listan algunas regulaciones que deben cumplir los materiales plásticos en función del sector (mercado colombiano).

- Plásticos en contacto con alimentos: Resolución 4143 de 2012 y Resolución 683 de 2012.
- Plásticos Para Juguetes: Resolución 686 de 2018.
- Bolsas Plásticas: Resolución 668 de 2016 y Resolución 2184 de 2019.

Para el sector automotriz cada marca define para cada pieza las especificaciones que deben cumplirse, en lo que se denomina el “cuaderno de cargas”. En esta industria es necesario surtir un proceso de validación u homologación de proveedores, de tal manera que se habilite al fabricante de las piezas como proveedor a nivel global.

Esto implica que un fabricante de resinas plásticas, a partir de material recuperado, deberá estar informado de las aplicaciones en las que sus materiales serán evaluados, con el fin de prever o mitigar posibles riesgos.



10



REFERENCIAS

- Acoplásticos. (2020). Plásticos en Colombia, 49. https://www.acoplásticos.org/boletines/2019/pec_2019_2020/pec20.pdf
- Al-Blooshi, A., Ahmed, U.I., Hassan, W. U. y Shammout, M. (2016). *Conceptual MSW Landfill Design and Waste-To-Energy Recovery Potential for Greater Dammam Area*. Prince Mohammad Bin Fahd University.
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P. y Baeyens, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Balde, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R. y Stegmann, P. (2017). *The Global E-waste monitor 2017*. United Nations University.
- Bart, J. C. J. (2005). Appendix II: Functionality of Common Additives Used in Commercial Thermoplastics, Rubbers and Thermosetting Resins. En J. C. J. Bart, *Additives in Polymers* (pp. 773–791). John Wiley & Sons.
- Bill, A. (2019, 16 y 17 de octubre). *Simple Methods for WEEE Plastic Identification and BFR Screening. EMPA, MPEL Waste & TFS Conference, Bucarest*. <https://www.impel.eu/wp-content/uploads/2019/10/15-Simple-methods-for-WEEE-plastic-identification-and-BFR-screening.pdf>
- Bill, A., Gasser, M., Haarman, A. y Böni, H. (2019). *Processing of WEEE plastics*. Step. <https://www.sustainable-recycling.org/wp-content/uploads/2019/12/Plastic-Handbook-Final.pdf>
- Braun, D. (2013). *Simple Methods for Identification of Plastics*. Hanser. <https://doi.org/10.3139/9781569905425>
- Boukhoulda, M. F., Rezoug, M., Aksa, W., Miloudi, M., Medles, K. y Dascalescu, L. (2017). Triboelectrostatic separation of granular plastics mixtures from waste electric and electronic equipment. *Particulate Science and Technology*, 35(5), 621–626. <http://dx.doi.org/10.1080/02726351.2017.1347226>
- Campuzano J, y Hernandez,A. (2019). *Diagnóstico gestores RAEE-UDV proyecto MADS-ICIPC*.
- Chen, X., Kroell, N., Wickel, J. y Feil, A. (2021). Determining the composition of post-consumer flexible multilayer plastic packaging with near-infrared spectroscopy. *Waste Management*, 123, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.015>
- Cobo, S, Dominguez-Ramos, A. y Irabien, A. (2018). From linear to circular integrated waste management systems: a review of methodological approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 279–295. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.003>
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S. C. y Rosa, P. (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.010>
- Dascalescu, L., Zeghloul, T. y Iuga, A. (2016). Electrostatic Separation of Metals and Plastics From Waste Electrical and Electronic Equipment. En A. Chngnes, G. Cote, C. Ekberg, M. Nilsson y T. Retegan (Eds.), *WEEE Recycling. Research, Development, and Policies* (pp. 75–106). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803363-0.00004-3>
- De Meester, S., Nachtergaele, P., Debaveye, S., Vos, P. y Dewulf, J. (2019). Using material flow analysis and life cycle assessment in decision support: A case study on WEEE valorization in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling* 142, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.015>
- Dewulf, W., Wagner, F., Bracquené, E., Peeters, J. R. y Duflou, J. R. (2019). Diversified recycling strategies for high-end plastics: Technical feasibility and impact assessment. *CIRP Annals*, 68(1), 3–6. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.004>
- Directiva 2012/19/UE del Parlamento europeo y el Consejo de la Unión Europea (4 de julio de 2012), sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:ES:PDF>
- Dodbiba, G., Shibayama, A., Miyazaki, T. y Fujita, T. (2002). Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone. *Magnetic and Electrical Separation*, 11(1–2), 63–92. <http://dx.doi.org/10.1080/07313630290002626>
- Dodbiba, G., Shibayama, A., Miyazaki, T. y Fujita, T. (2003). Triboelectrostatic separation of ABS, PS and PP plastic mixture. *Material Transactions*, 44(1), 161–166. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.161>
- Forrest, M. (2019). *Recycling of polyethylene terephthalate*. De Gruyter.
- Ganpat Pol, V. (2010). Upcycling: Converting Waste Plastics into Paramagnetic, Conducting, Solid, Pure Carbon Microspheres. *Environmental Science & Technology*, 44(12), 4753–4759. <https://pubs.acs.org/toc/esthag/44/12>

- Gaustad, G., Olivetti, E. y Kirchain, R. (2011). Toward Sustainable Material Usage: Evaluating the Importance of Market Motivated Agency in Modeling Material Flows. *Environmental Science and Technology*, 45(9), 4110–4117. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es103508u>
- Gaustad, G., Olivetti, E. y Kirchain, R. (2012). Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.010>
- Gaylord, N. G. (1989). Compatibilizing agents: Structure and function in polyblends. *Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry*, 26(8), 1211–1229. <https://doi.org/10.1080/00222338908052043>
- Gesellschaft, F. I. (2017). *CreaSolv(r) Process Presentation*.
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Lacovidou, E. y Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>
- Hamos EKS. (2021). Electrostatic plastic/plastic separators. https://www.hamos.com/front_content.php?idcat=1&idart=1&changelang=2
- Haupt, M., Vadenbo, C. y Hellweg, S. (2017). Do We Have the Right Performance Indicators for the Circular Economy?: Insight into the Swiss Waste Management System. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 615–627. <https://doi.org/10.1111/jiec.12506>
- Hopmann, C., Adamy, M. y Cohnen, A. (2017). Introduction to Reactive Extrusion. En G. Beyer y C. Hopmann (Eds.), *Reactive Extrusion* (pp. 1–10). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Identipol (s. f.). Home. Identipol.com. <https://identipol.com/>
- International Organization for Standardization. (2006). ISO 14044 Gestión ambiental — *Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
- International Organization for Standardization. (2016). ISO 11469:2016. Plastics — *Generic identification and marking of plastics products*. <https://www.iso.org/standard/63434.html>
- Jkmagnetic.com. *Magnetic Separation Equipments For Plastic Recycling Industries* <https://www.jkmagnetic.com/magnetic-separation-equipments-for-plastic-recycling-industries/>
- Kaya, M. (2018). Current WEEE recycling solutions. En F. Vegliò y I. Birloaga (Eds.), *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling*. Woodhead Publishing. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081020579000032>
- Koning, C., Van Duin, M., Pagnoulle, C. y Jerome, R. (1998). Strategies for compatibilization of polymer blends. *Progress in Polymer Science*, 23(4), 707–757.
- Ley 1672 de 2013 (19 de julio), Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), y se dictan otras disposiciones. *Diario oficial* 48.856. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1672_2013.html
- Menad, N. E. (2016). Physical Separation Processes in Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling. En A. Chngnes, G. Cote, C. Ekberg, M. Nilsson y T. Retegan (Eds.), *WEEE Recycling. Research, Development, and Policies* (pp. 53-74). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803363-0.00003-1>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Política nacional. Gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). *Sector plásticos: principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo. Guías ambientales*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Murphy, J. (2001). *Additives for Plastics Handbook*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-370-4.X5000-3>
- Nechifor, M., Tanasă, F., Teacă, C. A. y Zănoagă, M. (2018). Compatibilization strategies toward new polymer materials from re-/up-cycled plastics. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 23(8), 740–757.
- NE.Mold. (s. f.). *Material Compatibility Reference Chart*. Nemold.com. <http://www.nemold.com/pdfs/Compat-Chart.pdf>
- Plastic Recycling World. (2019). WEEE plastics: finding solutions in recycling. *Plastic Recycling World*, 2. <http://www.plasticrecyclingworld.com/Issue.aspx?Issueld=399>
- Perry, J. H. (1966). *Manual del ingeniero químico* (3ª ed.). UTHEA.

- Perry, R. H., Green, D. W. y Maloney, J. O. (2001). *Manual del ingeniero químico*. McGraw-Hill.
- Pol, V. G. (2010). Upcycling: Converting Waste Plastics into Paramagnetic, Conducting, Solid, Pure Carbon Microspheres. *Environmental, Science and Technology*, 44(12), 4753–4759. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es100243u>
- Recycling Internacional. (2008, 9 de octubre). "Mitsubishi to Reclaim PP, PS, ABS from Plastic Mixture with 99% Purity. *Recycling Internacional*. <https://recyclinginternational.com/business/mitsubishi-to-reclaim-plastics-with-99-purity/8272/>
- Resolución 076 de 2019 (16 de enero), Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), para el trámite de licencia ambiental de proyectos para la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, y/o aprovechamiento (recuperación/reciclado) de Residuos de Aparatos Eléctricos o Electrónicos (RAEE). *Diario oficial* 50.857. https://icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambienteds_0076_2019.htm
- Resolución 668 de 2016 (28 de abril), Por la cual se reglamenta el uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones. *Diario oficial* 49.859. https://www.minambiente.gov.co/images/57-Resolucion_No_0668-2016.pdf
- Resolución 683 de 2012 (28 de marzo), por medio de la cual se expide el Reglamento Técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales, objetos, envases y equipamientos destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para consumo humano. *Diario oficial* 48.388. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-0683-de-2012.pdf>
- Resolución 686 de 2018 (05 de marzo), Por la cual se expide el reglamento técnico que deben cumplir los juguetes y sus accesorios, que se fabriquen, importen y comercialicen en el territorio nacional. *Diario oficial* 50.526. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-686-de-2018.pdf>
- Resolución 2184 de 2019 (26 de diciembre), Por la cual se modifica la Resolución 688 de 2016 sobre uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones. *Diario oficial* 51.179. https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambienteds_2184_2019.htm
- Resolución 4143 de 2012 (7 de diciembre), por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales, objetos, envases y equipamientos plásticos y elastoméricos y sus aditivos, destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para consumo humano en el territorio nacional. *Diario oficial* 48642. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-4143-de-2012.pdf>
- Ritchie, M. (2020, 9 de julio). Plastics Compounding 101: The Art & Science of Custom Plastic Compounding. *Star Plastics*. <https://www.starplastics.com/plastic-compounding-101/>
- Rodriguez-Garcia, G. y Weil, M. (2016). Life Cycle Assessment in WEEE Recycling. En A. Chngnes, G. Cote, C. Ekberg, M. Nilsson y T. Retegan (Eds.), *WEEE Recycling. Research, Development, and Policies* (pp. 177-207). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803363-0.00007-9>
- Ryszard Wasilewski, Z. (2013). Energy recovery from waste plastics. *CHEMIK*, 5, 435–445.
- Shen, L., Worrell, E. y Patel, M. K. (2010). Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources Conservation and Recycling*, 55(1), 34–52. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.014>
- Special Chem. (s. f.a). *A Comprehensive Guide on Adhesion Promoters for Polymers*. SpecialChem.com. <https://polymer-additives.specialchem.com/selection-guide/adhesion-promoters-for-polymers>. Recuperado el 2021-11-10
- Special Chem. (s. f.b). *Crosslinkers / Curing Agents / Hardeners*. SpecialChem.com. <https://polymer-additives.specialchem.com/product-categories/additives-crosslinkers-curing-agents-hardeners>. Recuperado el 2021-11-10
- Special Chem. (s. f.c). *Plastic Additives*. SpecialChem.com. <https://polymer-additives.specialchem.com/> Recuperado el 2021-11-10
- Ramachandra Rao, S. (2006). Physical and Physico-Chemical Processes. *Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes* (pp. 35-69). Elsevier.
- United Nations Environmental Program y United Nations University (2009), *Recycling - from e-waste to resources*.
- Vermeulen, I., Van Caneghem, J., Block, C., Baeyens, J. y Vandecasteele, C. (2011). Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (UDVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1–3), 8–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.088>
- Wu, G., Li, J. y Xu, Z. (2013). Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review. *Waste Management*, 33(3), 585–597. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.014>

