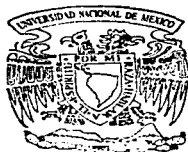


138
2ef.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

RECICLADO SECUNDARIO DE PLASTICOS DE
GRAN VOLUMEN OBTENIDOS A PARTIR DE
RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES EN
EL DISTRITO FEDERAL

Trabajo Monografico de Actualización
Que para obtener el titulo de
INGENIERA QUIMICA

p r e s e n t a

MARTHA ROA LUNA



México, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente	Prof. CARLOS GUZMAN DE LAS CASAS
Vocal	Prof. OCTAVIO MANERO BRITO
Secretario	Prof. MINERVA E. TELLEZ ORTIZ
1er. Suplente	Prof. VICTOR MANUEL LUNA PABELLO
2do. Suplente	Prof. MA. DEL ROCIO CASSAIGNE HERNANDEZ

Sitio donde se desarrolló el tema:

DEPARTAMENTO DE FISICOQUIMICA
LABORATORIO DE FISICOQUIMICA MACROMOLECULAR
FACULTAD DE QUIMICA, UNAM

Asesor del tema:



M. en C. MINERVA E. TELLEZ ORTIZ

Sustentante:



MARTHA ROA LUNA

Con amor a:

*Javier Alejandro,
orgullosa de ser tu mamá;*

*Francisco Javier,
por tu amistad y apoyo.*

A mi tía Victoria, con infinito amor, gratitud,
respeto y por ser un ejemplo a seguir.

A mi padre el Sr. Mario Roa, por saber ser padre.

Con todo cariño a mis hermanos:

Hilda Enriqueta, Silvia Georgina, Oscar Rubén y
Rita y a sus respectivas familias.

A mi abuelita Francisca Luna (QEPD), porque esté
donde esté, y a pesar del tiempo, sigue a mi lado.

A G R A D E C I M I E N T O S

A la M. C. Minerva E. Téllez Ortíz, la asesoría brindada a este trabajo, el apoyo, la paciencia y la amistad mostrados a lo largo de la realización del mismo.

Al M. C. Carlos Guzmán de las Casas y al Dr. Octavio Manero Brito, por las correcciones y comentarios tan acertados que hicieron al presente trabajo.

Al M. C. Rufino Nava y a la Ing. Marcela Piña por su ayuda en la alaboración de las figuras.

Al Ing. Sebastián Alonso Cruz de RECIMEX, al Lic. Martín Reich de Recuperadora y Maquiladora de Plásticos, S. A. de C. V., al Lic. Carlos Milet de Convertidora Industrial de Materiales, S. A. de C. V. y al Ing. Juan Robles de Reciclados Industriales Ecológicos, S. A. de C. V., por las facilidades otorgadas para la realización de visitas a las instalaciones.

Al Lic. Miguel de la Torre de Banobras, y al C. P. Elías Vanegas del Instituto Nacional de Recicladores A. C., por el préstamo de material informativo.

A todos ellos, las entrevistas concedidas y sus pláticas tan ilustrativas sobre el reciclado de los plásticos.

Gracias de todo corazón a nuestra:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

por haberme brindado la oportunidad de obtener una formación científica y humanística y porque en sus espacios conocí gente muy valiosa, maestros y compañeros, que han llegado a convertirse en verdaderos amigos.

A mis maestros dispuestos siempre a brindar sus conocimientos, muy especialmente a Antonio Lee Chong (CCH Sur), a Faustino Sánchez Garduño (Fac. Ciencias) y a todos los de mi querida Facultad de Química que han dejado huellas en mi formación académica y de quienes guardo gratos recuerdos.

Con la esperanza de que algún día todos los mexicanos reciban el derecho a la educación.

I N D I C E

1.	<i>INTRODUCCION</i>	2
1.1.	PROBLEMATICA MUNDIAL	4
1.2.	PROBLEMATICA EN EL DISTRITO FEDERAL	9
1.3.	REUTILIZACION DE RPPC	11
1.4.	OBJETIVOS	12
2.	<i>COMPOSICION DE RSM EN EL DISTRITO FEDERAL Y DISPOSICION</i>	13
2.1.	RSM PRODUCIDOS EN EL DISTRITO FEDERAL	13
2.2.	COMPOSICION GENERAL	15
2.3.	COMPOSICION DE RPPC EN LOS RSM	20
2.4.	DISPOSICION FINAL DE RSM EN EL DISTRITO FEDERAL	22
3.	<i>RECUPERACION DE PLASTICO A PARTIR DE RSM</i>	27
3.1.	SEPARACION	27
3.2.	PROCESOS DE RECUPERACION DE MATERIALES	39
3.3.	PROCESOS DE SEPARACION ESPECIFICOS PARA RPPC	58
4.	<i>RECICLADO DE PLASTICO</i>	81
4.1.	RECICLADO PRIMARIO	81
4.2.	RECICLADO SECUNDARIO	84
4.3.	RECICLADO TERCIARIO: PIROLISIS	86

4.4.	RECICLADO CUATERNARIO: INCINERACION	93
5.	PLASTICOS DE GRAN VOLUMEN	103
5.1.	POLIETILENO	103
5.2.	POLICLORURO DE VINILO	114
5.3.	POLIESTIRENO	118
5.4.	POLIPROPILENO	121
6.	TECNOLOGIA DEL RECICLADO SECUNDARIO DE RPPC	124
6.1.	SISTEMA DE CODIFICACION	124
6.2.	RPPC SEPARADOS	127
6.3.	RPPC MEZCLADOS	133
6.4.	EJEMPLOS DE INDUSTRIAS MUNDIALES DE RECICLADO SECUNDARIO	143
6.5.	EJEMPLOS DE ALGUNAS EMPRESAS QUE RECICLAN EN EL D.F. Y ZONA METROPOLITANA (ZMCM)	145
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	147
8.	BIBLIOGRAFIA	149

Terminología utilizada en el presente trabajo y siglas empleadas:

Cabe aclarar que, a lo que la gente en general llama basura, los profesionales del ramo le denominan **Residuos Sólidos Municipales**.

Los **Residuos Sólidos Municipales (RSM)**, provienen de cuatro fuentes:

- desechos domiciliarios
- basura de sitios de reunión y vías públicas
- residuos de obras de construcción y demolición
- desechos de oficinas, comercios, instituciones e industria (sin incluir los residuos propios de la operación industrial)

Los residuos propios de la actividad industrial, así como otros denominados especiales y/o peligrosos (entre los que se incluyen los corrosivos, los radioactivos, los tóxicos y los infecciosos) no forman parte de los RSM.

Por otro lado, los residuos plásticos contenidos en los RSM, están definidos por **Residuos Plásticos Post-consumo (RPPC)**, los cuales no incluyen a los residuos plásticos generados en las industrias.

1. I N T R O D U C C I O N

Desde el siglo XIX los países industrializados, han realizado investigaciones para desarrollar métodos y tecnologías, encaminados a la producción de materiales sintéticos llamados plásticos, los cuales han venido a sustituir en gran medida, a materiales tradicionales utilizados para satisfacer las necesidades del hombre ya que presentan algunas ventajas sobre estos últimos.

Debido a que el uso de estos materiales ha venido a facilitar y hacer más cómoda la vida de la humanidad, se producen en gran cantidad para satisfacer su demanda. Sin embargo, en los últimos años se ha presentado un serio problema debido a que:

"El periodo de vida útil tan corto de los objetos fabricados con plástico y su uso indiscriminado han provocado que una gran cantidad de estos materiales lleguen a parar a los basureros."⁽¹⁾

En la tabla 1.1 se reporta el tiempo de vida media de algunos productos plásticos.⁽¹⁾

Tabla 1.1 Vida media de productos plásticos ⁽¹⁾

Producto	Vida estimada en años
Empaque	< 1
Novedades	< 1
Película fotográfica	< 1
Utensilios para alimentos	< 1
Construcción	2
Calzado	2
Ropa	4
Utensilios caseros	5
Juguetes	5
Artículos deportivos	7
Artículos para automovil	10
Discos	10
Equipaje	10
Muebles	10
Cables	15
Máquinas para negocios	15
Equipo eléctrico	15
Maquinaria	15

En este trabajo primero se dará un panorama general de la situación mundial, en cuanto a la cantidad de RSM en el que se incluyen los RPPC, posteriormente se revisará la problemática existente en nuestro país.

1.1. PROBLEMÁTICA MUNDIAL

Estados Unidos generó en 1988, 180 millones de toneladas de RSM. Basados en un estudio de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) se afirma que el 8% en peso de los 180 millones de toneladas de RSM es decir, alrededor de 14.4 millones de toneladas son RPPC, los cuales representan cerca de un 20 % en volumen.

En la figura 1.1 se presenta información del porcentaje en peso de los componentes de RSM en Estados Unidos en 1988.⁽²⁾

En la figura 1.2 se muestra el porcentaje en volumen de cada tipo de material en dicho país.⁽²⁾

En la figura 1.3 se observa que en ese mismo año, ocupan el 60 % de RSM recipientes, empaques y bienes no duraderos, de los cuales, el 73 % fue dispuesto en rellenos sanitarios, el 14 % incinerados y el 13 % recuperados. El papel y el cartón han sido los mayores contribuyentes de RSM desde 1960 a la fecha. Los residuos de jardín, los cuales pueden ser degradados por composta ocupan el segundo lugar, los RPPC el cuarto lugar, con el 8 % en peso y casi el 20 % en volumen.⁽²⁾

Por otra parte, el Instituto Mexicano del Plástico Industrial, reporta que en el mundo, el total de RSM producidos en 1991 fue 775 millones de toneladas. En la gráfica 1.1 se puede observar las cantidades que generaron algunos países.⁽³⁾

Para 1994 Estados Unidos generó 260 millones de toneladas de RSM. En la gráfica 1.1 se puede observar la producción de RSM de varios países.⁽⁴⁾

Fig. 1.1 RSM en los E. U.

% en peso [2]

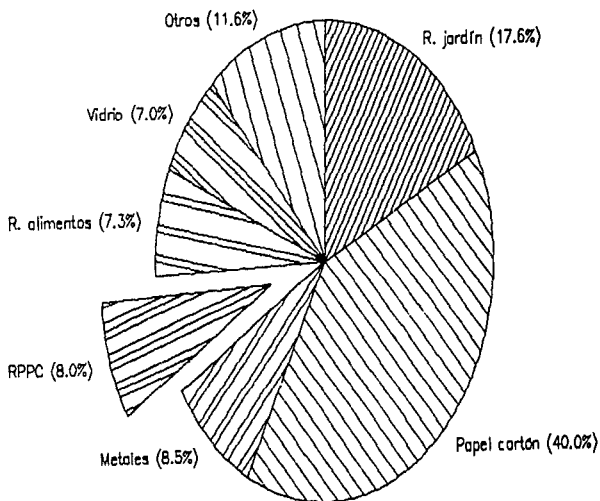


Fig. 1.2 RSM en los E. U.

% en volumen [2]

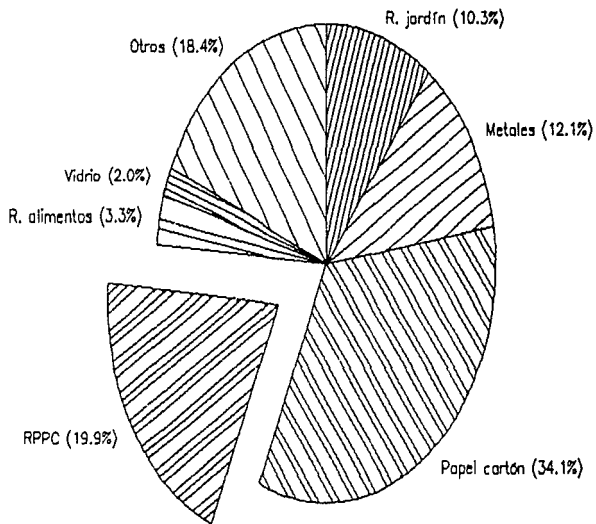
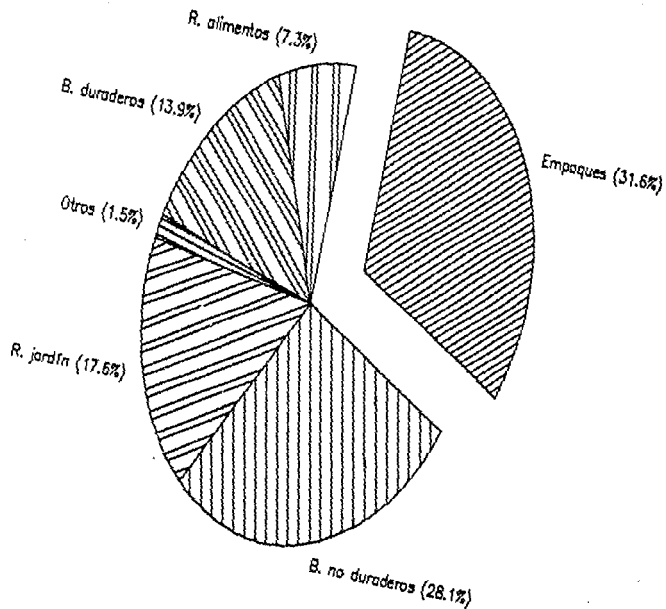
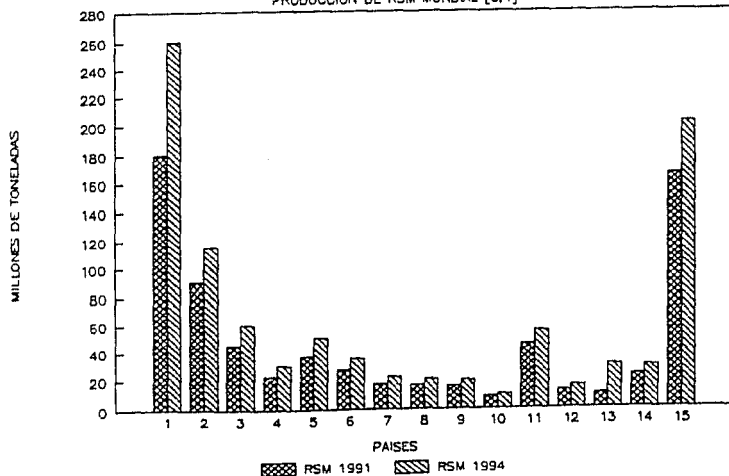


Fig. 1.3 RSM en los E. U.
por tipo de producto [2]



GRAFICA 1.1
 PRODUCCION DE RSM MUNDIAL [3,4]



PAIS	CLAVE	PAIS	CLAVE	PAIS	CLAVE
ESTADOS UNIDOS	1	REINO UNIDO	6	BRASIL	11
JAPON	2	FRANCIA	7	ESPAÑA	12
ALEMANIA	3	KOREA	8	BELGICA	13
ITALIA	4	TAIWAN	9	MEXICO	14
CHINA	5	CANADA	10	OTROS	15

1.2. PROBLEMÁTICA EN EL DISTRITO FEDERAL

En México en 1994, con 90,500,000 habitantes se produjeron 80,746 toneladas de RSM al día. Cada mexicano genera diariamente 0.893 kg, en promedio de diversos tipos de residuos. Es decir al año, se originan 29,472,439 toneladas de RSM. Actualmente se estima que en toda la nación, el 47 % de RSM están constituidos por residuos orgánicos (alimentos, animales y de jardín) y el 34 % por residuos de envases y embalajes y materiales que los forman.^[5]

Los volúmenes de RSM producidos diariamente dentro de la ciudad de México y la zona metropolitana se encuentran diferenciados por zonas, en función del número de habitantes y sus respectivos niveles socioeconómicos en cada delegación y municipios de la zona metropolitana, y por la extensión de las actividades institucionales, comerciales e industriales que se desarrollan dentro de estas áreas.

Estadísticas recientes sobre los RSM del Distrito Federal se encuentran resumidas en el Plan Maestro de Desechos Sólidos 1984-1988. En los datos se indica que se generaron 9,700 toneladas diarias de RSM dentro del Distrito Federal durante 1984, con un promedio de 0.97 kg/día por persona.^[6]

De acuerdo con los datos del DDF, la población de Distrito Federal, se incrementa en un promedio de 3.2 % anualmente y la generación de residuos per cápita aumenta en un 3% por año por lo que para finales de 1987, la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) estimó una generación promedio de 10,700 toneladas por día.^[6]

En la actualidad, Sedesol estima que se generan, en el Distrito Federal 11,596 toneladas diarias de RSM.^[5]

Sin duda, la capital mexicana ha sido en el presente siglo, un polo concentrador de actividades económicas, políticas y de servicios, lo que facilitó una enorme centralización de la vida nacional. Uno de los reflejos más dramáticos de esta centralización ha sido la permanente expansión de la mancha urbana hacia poblados y municipios cercanos, conformando la llamada Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), lo cual ha obligado a replantear que las políticas locales del D.F., no pueden ser vistas aisladamente de las del conjunto de la ZMCM, ya que en realidad no sólo comparten un ámbito geográfico específico sino que sus problemas son comunes y muchas de las veces están indisolublemente relacionados.

Datos extraoficiales del DDF, señalan que en 1988 la población de Distrito Federal, es similar o acaso inferior al número de habitantes de los municipios de la ZMCM y entre ambos la cifra es de 20 millones de habitantes.

En 1986 se generaron 7,616 Ton/día de RSM en 15 municipios. En total, para el año 1992 se generaron 20,000 toneladas de RSM diariamente en los 17 municipios del Estado de México y el Distrito Federal.⁽⁷⁾

Los RSM surgen como un problema que se puede ver como contaminación ambiental, como imagen sucia y descuidada, o bien, como un enorme potencial económico, que es aprovechado en una mínima parte.

Si se toma en cuenta, como se acaba de mencionar, que tan sólo en el Distrito Federal se generan 11,596 toneladas por día de RSM y que contienen aproximadamente un 5% de RPPC (datos que se detallan en el capítulo 2) se está hablando de:

$11,596 \text{ ton/día} \times 0.05 \times 365 \text{ días/año} = 211,627 \text{ Ton/año de RPPC.}$

1.3. REUTILIZACION DE RPPC

Se han llevado a cabo diversos esfuerzos aislados para el reciclado de RPPC y así se han podido obtener un gran número de productos . A continuación se da una lista de objetos obtenidos de RPPC reciclados: (6)

OBJETOS	PLASTICO RECICLADO
Tubería para drenaje	PEAD
Corrales y cercas para animales	PVC
Maderos para embarcaderos	PEAD
Productos de construcción	PEAD
Conos para tráfico	PEAD
Juguetes	PEAD
Macetas	PEAD, PP
Muebles para jardín	PEAD
Botes para basura	PEAD, PVC
Bidones	PEAD, PP
Cajas para botellas de leche y refrescos	PEAD
Autopartes (baterías)	PP
Comederos para animales	PP
Barandales	PVC
Jardineras	PVC
Marcos para ventanas	PVC
Botellas para sustancias químicas	PEAD
Accesorios para oficina	PVC
Cables para teléfono	PVC

Los RPPC reciclados de los RSM resultan una mezcla compleja de diferentes plásticos. La preparación de esta mezcla está limitada por la recolección de recipientes que son fáciles de reconocer, tales como botellas de refrescos, leche y detergentes. El resto de los plásticos son mezclas que se pueden utilizar para manufacturar productos con propiedades

menos exigentes tales como puertas exteriores de cercas, bolígrafos, mesas para picnic, etc.

1.4. OBJETIVOS

El presente trabajo monográfico se enfocará al estudio de los RPPC contenidos en los RSM, con los siguientes objetivos:

- 1) Presentar cuáles son los plásticos de gran volumen reportados, que se encuentran dentro de los RPPC en el Distrito Federal;
- 2) Presentar los procesos más usados en la separación de RSM;
- 3) Presentar los procesos de separación específicos para RPPC;
- 4) Presentar información sobre las posibles mezclas que se pueden llevar a cabo de los plásticos de gran volumen;
- 5) Buscar algunas empresas existentes en el Distrito Federal, y tratar de investigar su metodología utilizada para reciclar plásticos de gran volumen.

2. COMPOSICION DE RSM EN EL DISTRITO FEDERAL Y DISPOSICION

2.1. RSM PRODUCIDOS EN EL DISTRITO FEDERAL

Se considera que los RSM se mueven dentro de un sistema cerrado llamado medio ambiente y es dentro de este sistema que se presenta un ciclo de residuos y reaprovechamiento de los mismos, ya que después de salir de las manos de los consumidores siguen una serie de pasos que van dándoles un valor determinado. Esto es, los residuos van adquiriendo un valor de acuerdo con la fuerza de trabajo invertida en ellos, quizá no siempre comparable con el valor de otros productos, pero sí adquieren un valor, mismo que a lo largo de todo el ciclo va aumentando y llega al final hasta el punto de partida donde el consumidor adquiere bienes que le son necesarios y que muchas veces tienen su origen o parte de él en los mismos residuos que tiró durante la primera fase de este ciclo (ver la figura 2.1).⁽⁶⁾

Los RSM del Distrito Federal han implicado desde hace muchos años un serio problema para las autoridades de la capital. Actualmente no existe un registro único que permita observar tanto el crecimiento de las cantidades de residuos como la real efectividad de los sistemas de recolección, por lo cual existen diferentes fuentes que a veces llegan a ser contradictorias entre sí.

La información que se presenta en seguida son datos de los años 1975 a 1988, reportados por Castillo Berthier en su libro "La sociedad de la basura: caciquismo en la ciudad de México", quien se ha dedicado a hacer estudios extensos sobre este tema y proporciona información de primera mano.

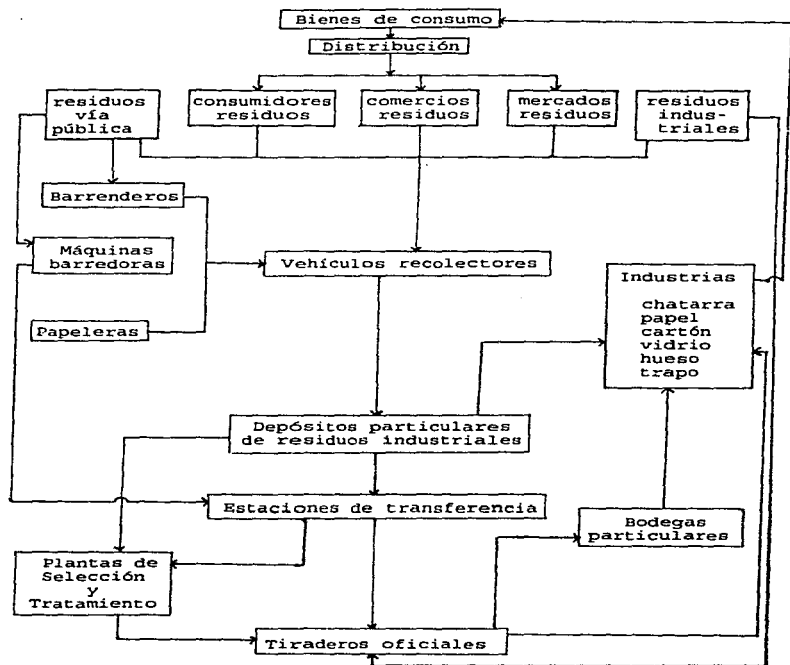


Fig. 2.1 Circulación de RSM en el Distrito Federal.

Para años más recientes, de 1988 a 1995 se tomaron en cuenta las cifras reportadas por la Dirección General de Servicios Urbanos, DGSU, y por Sedesol.

En la tabla 2.1 se presentan las cantidades de RSM de 1975 a 1979, así como datos poblacionales. Como se puede observar, en esos cinco años, los RSM tuvieron un aumento del 230.9%, mientras que la población se incrementó solamente en un 5%.⁽⁶⁾

En la tabla 2.2 se indica la distribución de los RSM en el Distrito Federal con el total de residuos recolectados por cada delegación en los años 1984 y 1986.⁽⁶⁾

En 1992 el Distrito Federal produjo 10,056 toneladas diarias de RSM. Para los años de 1993 y 1994 la Sedesol estima que se generaron 11,081 y 11,596 toneladas diarias respectivamente.⁽⁶⁾

En la tabla 2.3 se reportan cifras de generación de RSM en las 16 delegaciones del Distrito Federal y 19 municipios de la ZMCM en 1995. Siendo un total de 11,140 toneladas para el Distrito Federal y 8,481 toneladas para los municipios.⁽⁹⁾

2.2. COMPOSICION GENERAL

Los datos para definir la composición de los RSM se presentan en la tabla 2.4. Los cambios observados en su composición entre 1975 y 1978 responden a patrones observados en la práctica, tanto en México como en otros países, y corresponden a una disminución de residuos orgánicos (vegetales, animales, etc.) frente a un relativo aumento de los RPPC y otros de origen inorgánico, ocasionados por el aumento y la modernización de las industrias que venden los alimentos procesados.⁽⁶⁾

Tabla 2.1 [6]

Cantidades de RSM y crecimiento por años

AÑOS	1975	1976	1977	1978	1979
TON. DIARIAS	4153	5403	7165	9589	9600
TON. ANUALES	1515845	1972095	2915225	3500000	3504000
TASA PROMEDIO CRECIMIENTO AÑOS	30% 75/76	32.6% 76/77	33.8% 77/78	0.1% 78/79	

Incremento porcentual 1975-1979 = 230.9%

POBLACION EN EL D. F.

AÑOS	1975	1976	1977	1978	1979
POBLACION DF	8578206	8877024	8835512	8879083	9007736
TASA PROMEDIO CRECIMIENTO AÑOS	3.5% 75/76	-0.5% 76/77	0.5% 77/78	1.4% 78/79	

Incremento porcentual 1975-1979 = 5%

Tabla 2.2 [6]

Distribución de los RSM en el D.F., por delegación

DELEGACION	1984		1986	
	RSM	‡	RSM	‡
	Ton/día	peso	Ton/día	peso
Alvaro Obregón	666	6.9	638	6.4
Azcapotzalco	732	7.6	562	5.6
Benito Juárez	589	6.1	662	6.6
Coyoacán	622	6.4	758	7.6
Cuajimalpa	97	1.0	116	1.1
Cuauhtémoc	966	9.9	1281	12.8
Gustavo A. Madero	1536	15.8	1530	15.2
Iztacalco	587	6.1	543	5.4
Iztapalapa	1286	13.1	1365	13.6
Magdalena Contreras	179	1.8	189	1.9
Miguel Hidalgo	693	7.1	831	8.3
Milpa Alta	85	0.9	54	0.5
Tláhuac	200	2.1	122	1.2
Tlalpan	390	4.0	310	3
Venustiano Carranza	836	8.6	874	8.7
Xochimilco	230	2.4	208	2.1
Total	9694	100.0	10043	100

Tabla 2.3 [9]

Generación de RSM en el D. F. y
Zona Metropolitana, 1995

Delegaciones	Ton/día	Municipios	Ton/día
1 Alvaro Obregón	574	1 Atenco	23
2 Azcapotzalco	486	2 Atizapán de Zaragoza	500
3 Benito Juárez	626	3 Chalco	280
4 Coyoacán	650	4 Chicoloapan	30
5 Cuajimalpa	111	5 Chimalhuacán	350
6 Cuauhtémoc	980	6 Coacalco	130
7 Gustavo A. Madero	1597	7 Cuautitlán	50
8 Iztacalco	466	8 Ecatepec	1500
9 Iztapalapa	1808	9 Huixquilucan	150
10 Magdalena Contreras	183	10 Ixtapaluca	170
11 Miguel Hidalgo	699	11 Izcalli	390
12 Milpa Alta	65	12 Los Reyes la Paz	41
13 Tláhuac	139	13 Naucalpan	1906
14 Tlalpan	411	14 Nezahualcóyotl	1600
15 Venustiano Carranza	853	15 Nicolás Romero	150
16 Xochimilco	187	16 Tecámac	114
17 Varios	1305	17 Tlanepantla	800
		18 Tultitlán	145
		19 Texcoco	152
Total Distrito Federal	11140	Municipios Conurbados Estado de México	8481

Tabla 2.4 [6]

Composición de los RSM en el D. F. (1975, 1978)

COMPONENTES	%	1975	%	1978
	peso	Ton/día	peso	Ton/día
Orgánicos	49.50	2970.40	36.50	1997.00
Papel y cartón	19.50	1170.70	20.80	1017.00
Chatarra	3.30	195.40	10.60	1017.00
Vidrio	8.30	496.00	11.00	1056.00
RPPC	4.10	230.00	5.40	518.00
Trapo	4.20	252.00	5.90	566.00
Construcción	1.30	76.80	2.40	231.00
Materia Perdida	5.50	349.70	4.30	413.00
Otros	4.30	258.00	3.10	298.00
Total	100.00	6000.00	100.00	9600.00

Tabla 2.5 [10]

Composición de los RSM en el D. F.
(1995)

SUBPRODUCTOS	% peso
Cartón	6.97
Residuos finos	2.63
Hueso	0.19
Hule	0.37
Lata (aluminio)	1.54
Material ferroso	1.45
Material no ferroso	0.56
Papel	15.45
Pañal desechable	1.58
RPPC	4.79
Residuos de jardinería	4.83
Residuos alimenticios	36.40
Trapo	0.37
Vidrio de color	2.84
Vidrio transparente	4.69
Otros	15.34
Total	100.00

Los estudios realizados durante 1995 sobre la composición porcentual de los principales materiales que integran los RSM, muestran los resultados en la tabla 2.5.⁽¹⁰⁾

La composición media de los residuos orgánicos (alimentos y de jardín) representa aproximadamente el 41% del total de la generación de los RSM.

Entre los principales materiales destacan el papel con 15.45%, vidrio de color y transparente con el 7.53%. Los RPPC representan el 4.79% y el aluminio el 1.54%. Como se puede observar, los principales materiales de los RSM, excluyendo los residuos orgánicos (alimentos y de jardín) provienen de envases (recipientes en contacto directo con el producto) y embalajes (contenedores para transportar envases o productos a granel) ya que éstos son fabricados a base de metales (hojalata, lámina negra, acero, zinc, estaño y aluminio), vidrio transparente o de color, papel, cartón y plásticos.

2.3. COMPOSICION DE RPPC EN LOS RSM

Es difícil saber con exactitud la cantidad de cada uno de los diferentes plásticos existentes en los RSM, ya que el Distrito Federal y las zonas urbanas principales del país no cuentan con estudios confiables de composición de los RSM.

Con relación a los plásticos, en México existe una infinidad de productos que no especifican su composición, sin embargo seis resinas termoplásticas son las más utilizadas en empaques, envases, película y botellas de uso doméstico y debido a que su periodo de vida es muy corto pasan a formar parte rápidamente de los RSM.

En la tabla 2.6 se puede observar el consumo aparente

(producción + importación - exportación) de estas 6 resinas, en los últimos 2 años.⁽¹¹⁾

Tabla 2.6 Consumo aparente de resinas termoplásticas.⁽¹¹⁾

Resinas Termoplásticas	C O N S U M O		A P A R E N T E	
	1994	1995	1994	1995
	TON	TON	%	%
Poli(Cloruro de Vinilo)	259,069	178,911	13.84	10.93
Polímeros de Estireno	152,110	144,498	8.13	8.86
Polipropileno	245,427	233,621	13.11	14.33
Polietileno Alta Densidad	359,230	284,212	19.19	17.43
Polietileno Baja Densidad	465,692	407,440	24.88	24.99
Polietileno Tereftalato	28,750	37,895	1.54	2.32
Total Termoplásticas			80.69	78.90

Estas resinas representan aproximadamente el 80 % del consumo de plásticos. Los RPPC contenidos en los RSM forman parte del 95%, teniendo la siguiente composición:⁽¹²⁾

PEBD	44%
PEAD	22%
PP	9%
PS	8%
PVC	8%
PET	5%
OTROS	2%

2.4. DISPOSICION FINAL DE RSM EN EL DISTRITO FEDERAL

A) Tiradero a cielo abierto.

Una práctica común en nuestro país y particularmente en el Distrito Federal, ha sido la de disponer los RSM en tiraderos a cielo abierto. Es el método más sencillo de eliminación de residuos y consiste en destinar un área determinada para depositarlos sin ningún control y dando lugar a serios problemas de contaminación como:

- a) generación de lixiviados que provocan contaminación de los mantos acuíferos de la cuenca hidrológica del Valle de México;
- b) emanación de gases que producen malos olores e incendios dañando la salud de la población;
- c) proliferación de insectos y roedores.⁽¹³⁾

Se tienen problemas de dispersión de los plásticos tipo película por la acción de los vientos, originando alteraciones en terrenos agrícolas y taponamientos de alcantarillas.

Cabe señalar que en 1982 existían siete tiraderos a cielo abierto que se han ido clausurando paulatinamente en los últimos años, quedando a la fecha el tiradero de Santa Catarina.⁽¹⁴⁾

Destacan por su importancia y dimensión la clausura del tiradero de Santa Cruz Meyehualco que tenía una extensión de 160 ha, y estuvo en operación por más de 25 años.

En 1985 se clausuró el tiradero de San Lorenzo Tezonco, que ocupaba el tercer lugar en importancia en el Distrito

Federal y que recibía dos mil toneladas diarias de RSM.

En mayo de 1987 se cerró el tiradero de Santa Fe con una extensión de 60 ha y que por 35 años constituyó un sitio tradicional de disposición final en el poniente del Distrito Federal.

En junio de 1994 se clausuró el sitio de disposición final Prados de la Montaña ubicado al poniente del Distrito Federal, el cual contaba con una extensión de 24.6 ha. Dió servicio por 8 años.

También se clausuraron los tiraderos de Tlalpan, Milpa Alta y Vaso de Texcoco.

Posteriormente al proceso de clausura se ha llevado a cabo el saneamiento y regeneración de los sitios, convirtiendo los antiguos tiraderos a cielo abierto en áreas verdes y parques recreativos. Actualmente se cuenta con 300 ha en donde los procesos de rehabilitación han sido concluidos conformando la Alameda Oriente (extiradero de Santa Cruz Meyehualco) y la Poniente (antes Santa Fe).

Estos sitios de esparcimiento y recreación tienen una amplia infraestructura deportiva, extensas áreas reforestadas, zonas de convivencia y han adquirido relevancia en el contexto urbano tanto por su impacto en el mejoramiento del ambiente como en el paisaje del entorno.⁽¹⁴⁾

Subsiste todavía el último tiradero a cielo abierto como enterramiento controlado, mal llamado relleno sanitario de Santa Catarina, con una organización de pepenadores quienes lo siguen manejando como tiradero y esto hace que siga contaminando la ciudad.⁽¹⁵⁾

B) Relleno sanitario

El relleno sanitario es el elemento básico para la disposición de los RSM en México. La principal razón para ello es que los tiraderos y los rellenos han ofrecido tradicionalmente a los municipios la opción más fácil y barata para la disposición final de los RSM.

Los rellenos sanitarios son y continuarán siendo, un método necesario para la disposición de los RSM. Entre los factores que deben considerarse prioritariamente para la definición de nuevas ubicaciones de rellenos sanitarios, están los criterios de diseño, de ingeniería, legales, reglamentarios, de impacto ambiental, políticos y económicos.

Los rellenos deben contar con sistemas de impermeabilización, controles rígidos para el monitoreo de las aguas subterráneas y sistemas de captación de los lixiviados generados y del biogás (CH_4 y CO_2) producido.

La unidad de todo relleno sanitario es la celda diaria en donde se esparce y se compactan los RSM durante un día, al final del mismo son cubiertos con una capa de algún material, que en caso de ser suelo también se compacta. El funcionamiento de esta celda requiere de instalaciones complementarias para que su operación sea segura como:

- sistema de impermeabilización
- pozos de monitoreo de lixiviados
- sistema de monitoreo de biogás
- sistema de captación de biogás
- sistema de captación y tratamiento de lixiviados.⁽¹⁴⁾

De las plantas de selección, (de las que se hablará posteriormente), y de muchas otras partes del Distrito Federal, 8,500 toneladas de RSM llegan a Bordo Poniente, en

el vaso de Texcoco para su disposición final.⁽⁹⁾

El proyecto Bordo Poniente arrancó en 1984 y lleva ya cuatro etapas de vida, en las cuales el trabajo técnico ha rendido sus frutos. El relleno sanitario controlado, la compactación de desechos, el control de lixiviados, los respiraderos de biogás y la reforestación de páramos hoy son una realidad.⁽⁹⁾

Los RPPC no son tóxicos, no contaminan, no producen enfermedades, no infectan, no envenenan, no propician el desarrollo de microorganismos, no producen hedores, solamente afean el paisaje y producen un rechazo visual.

El hecho de que los plásticos no se degraden en un tiempo corto, lo cual es considerado como uno de sus principales defectos, es probablemente una de sus grandes virtudes. La mala fama que han adquirido es innecesaria. Aunque las botellas y frascos de plástico ocupen mucho espacio en anaqueles, tiendas y alacenas de cocina, la situación no es la misma en los rellenos sanitarios. Los RPPC después de haber sido compactados en los camiones de recolección o en las estaciones de transferencia, y después de pasar un par de años en un relleno sanitario, bajo toneladas de residuos más recientes, quedan totalmente aplastados, ocupan menos espacio, en general, que las latas o las botellas de vidrio. Además puesto que los plásticos son inertes, no introducen compuestos tóxicos a su entorno.⁽¹⁵⁾

Los RPPC consumen una porción substancial de la capacidad del relleno sanitario pero no representan una parte tan grande como para haber sido estimada en algún estudio teórico de volúmenes de residuos.

Además, los RPPC son comprimidos en el relleno y no consumen una capacidad excepcional debido a su resiliencia, ocupando aproximadamente el 16% en volumen dentro del relleno.

Los RPPC pueden disminuir la velocidad de degradación de los residuos orgánicos. En Estados Unidos, algunos investigadores de la Environmental Protection Agency (EPA) han examinado la velocidad de degradación de éstos en los rellenos sanitarios, medida por la velocidad de generación del gas metano.

La EPA⁽¹⁵⁾ llevó a cabo un estudio que consistió en la construcción y análisis de 19 rellenos simulados por un periodo de 10 años. Este estudio fue diseñado para analizar las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas en los rellenos y se encontró que los residuos orgánicos se preservan dentro de bolsas de plástico o rodeados por plásticos.

Muchos residuos biodegradables por sí solos incluyendo comida y materia fecal se encontraron bien protegidos por bolsas de plástico para basura y por otras envolturas después de una década.

Sin embargo, en operaciones normales de relleno las bolsas se rompen y los residuos se exponen a los elementos del relleno sanitario, así los RPPC no parecen inhibir la velocidad de degradación.

Los RPPC no generan lechadas tóxicas. Algunos análisis de lechadas de monitoreos detectaron sustancias químicas orgánicas usadas como plastificantes, di(2-etilhexil) ftalato, sin embargo no excedieron los límites de toxicidad.⁽¹⁶⁾

3. RECUPERACION DE PLASTICO A PARTIR DE RSM

3.1. SEPARACION

A pesar de que los RPPC constituyen sólo una pequeña porción de los RSM, la cantidad actual es enorme (ver subcapítulo 1.2). Para recuperar los componentes de los RSM, primero deben separarse y para este propósito existen numerosos procesos comerciales y experimentales.

En la actualidad la mayoría de las plantas de separación existentes constan de dos etapas principales:

- 1) Reducción de tamaño,
- 2) Separación.

3.1.1. REDUCCION DE TAMAÑO (1)

La reducción de tamaño de los RSM consiste en cortar el material y formar piezas más pequeñas. Esto se realiza principalmente por fuerzas de tensión, compresión y corte, aplicadas por machacadoras, cortadoras, desfibradoras, pulverizadoras, molinos de escofina, de discos y de martillo.

La figura 3.1 indica esquemáticamente los cuatro tipos principales de machacadoras. Todas estas pueden ser usadas en las plantas de separación de residuos, aunque las machacadoras de impacto tienen una amplia aplicación, las machacadoras de mandíbula, de engranes y giratorias se usan principalmente para materiales quebradizos.

Las cizallas de una cuchilla indicadas en la figura 3.2

aplican fuerzas de corte para cortar materiales voluminosos.

Las desfibradoras y las cortadoras, figura 3.3, utilizan fuerzas de corte y tensiles. Las de tipo de "perforar y desgarrar" usan ruedas dentadas que rotan a diferentes velocidades, las cuales penetran, cortan y desfibran el material. Este tipo de desfibradora se utiliza para reducir materiales fibrosos o dúctiles y el papel contenidos en los RSM.

El molino de escofina utiliza fuerzas de tensión, compresión y corte. El rotor está empotrado en una flecha vertical que lleva brazos escofinados, los cuales ejercen presión sobre los residuos y éstos pasan a través de agujeros en el fondo de la cámara, ver la figura 3.4.

El molino de martillo comprende un equipo donde se puede reducir de tamaño una gran proporción de residuos. Este consiste de un eje con uno o varios rotores provistos de martillos y trabaja aplicando fuerzas de tensión, compresión y corte. Hay dos tipos generales: el de martillo que gira y el de martillo rígido. Los molinos de martillo pueden ser usados para un amplio rango de alimentación de materiales, ver la figura 3.5.

3.1.2. SEPARACION MANUAL ⁽¹⁷⁾

Es la técnica más simple y antigua para la separación de materiales de los RSM. La primer instalación de separación manual fue construida por Colonel Waring en Nueva York en 1898.

En la actualidad las personas que trabajan como "separadores manuales" tienen dos grandes funciones:

Primero, ellos recuperan cualquier artículo de valor que no



de mandíbula de engranes de impacto giratoria

Fig. 3.1 Principales tipos de machecadoras.

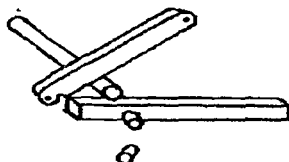


Fig. 3.2 Cizallas de una cuchilla.



Fig. 3.3 Desfibradoras y cortadoras.

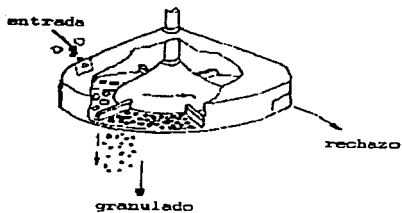


Fig. 3.4 Molino de escofina.

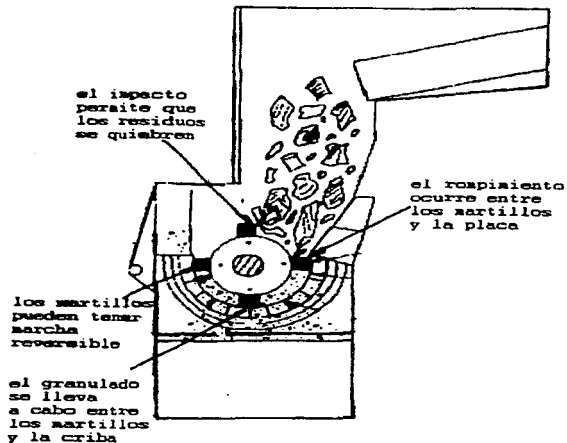


Fig. 3.5 Molino de martillo.

necesite ser procesado. Comúnmente recuperan cartón corrugado, bultos de periódico, piezas de metal grandes. Su segunda función consiste en remover todos aquellos artículos que podrían causar daño al resto del proceso.

Las funciones de separación manual son simples de definir, los residuos se reconocen visualmente por propiedades tales como color, reflectividad y opacidad y se separan con una varilla. Se utiliza una banda transportadora que lleva los RSM hacia el primer proceso mecánico, usualmente una desfibradora.

La banda va cargada con los RSM y los "separadores manuales" están colocados a cada lado de la banda transportadora y remueven los materiales seleccionados.

Se ha visto que por medio de esta técnica pueden recuperarse cerca de 0.5 ton/h por persona. Una banda debe medir no más de 60 cm de ancho, cuando sólo de un lado hay "separadores manuales" ó 90 a 120 cm cuando hay de ambos lados y debe ir a una velocidad no mayor a 9 m/min.

3.1.3. SEPARACION POR GRAVEDAD (1)

Los equipos usados para la separación por gravedad son: mesas vibrantes, bandas inclinadas para remover las piedras y otras partículas pesadas y separadores de lecho fluidizado.

3.1.4. SEPARACION POR AIRE (17)

Se utilizan tres parámetros en la separación por aire: tamaño, peso específico y forma. Generalmente se emplean

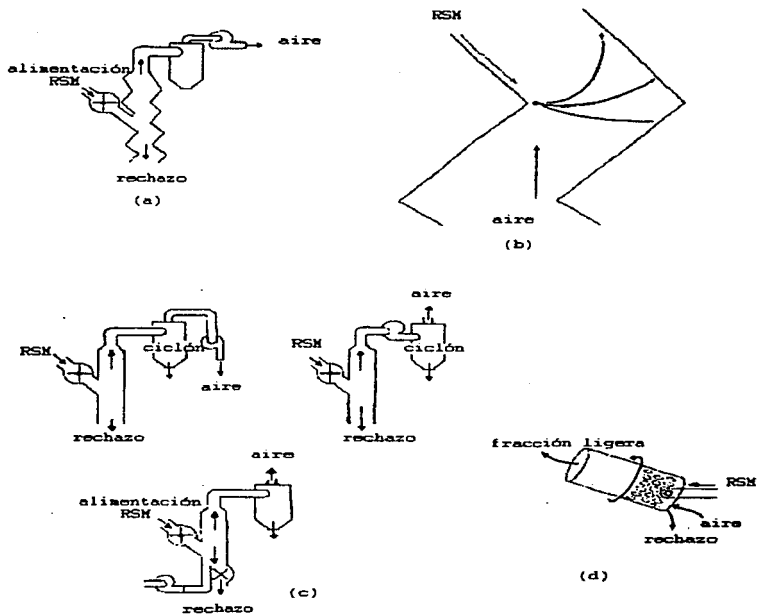


Fig. 3.6 Separadores de aire, a) columna en forma de zigzag; movimiento de los residuos en un separador de zigzag; c) tres arreglos básicos de los separadores de aire; d) separador de aire rotatorio.

columnas con forma de zigzag o similar. El aire entra en el fondo de la columna y los residuos se separan en la parte media. Una serie de columnas con diferentes geometrías o velocidades de flujo, producen varios grados de materiales, las fracciones ligeras se colectan en la parte superior en un ciclón, mientras que el aire y el polvo se reciclan en la columna.

En lugar de separador de columna vertical, se puede usar un separador de vórtice en el cual el aire fluye radialmente hacia adentro. Otros tipos de separadores de aire, utilizan flujo de aire horizontal, una cámara rectangular con deflectores zigzag, un cilindro rotatorio, una corriente de aire y paletas verticales. Ver la figura 3.6.

La separación de un sistema específico depende del tipo de alimentación y del grado de separación deseado. La separación por aire es la técnica más ampliamente usada para la separación de RSM.

3.1.5. SEPARACION MAGNETICA ⁽¹⁷⁾

El uso de una fuerza asociada con un campo magnético para la extracción de materiales ferrosos es probablemente uno de los procesos más simples, efectivos y económicos usados para separar componentes de los RSM.

Los dispositivos de separación magnética convencionales están generalmente restringidos a separar materiales ferromagnéticos, tales como acero y magnetita.

Un campo magnético se puede definir en términos de un solenoide que comprende un número de vueltas de alambre alrededor de un cilindro y conduce una corriente I . La intensidad del campo magnético H en el interior del

solenoides está dado por:

$$H = \frac{n I}{l}$$

donde:

H = intensidad del campo magnético, A/m
 n = número de vueltas
 l = longitud del solenoide, m
 I = corriente, A

La intensidad del campo magnético, análogo al esfuerzo mecánico, es la inducción magnética B, (también llamada densidad del flujo magnético). B está definido por la ley de Faraday de inducción electromagnética como:

$$- \frac{dB}{dt} = \frac{V}{A}$$

donde :

B = densidad del flujo magnético
 V = voltaje
 A = área transversal a las líneas del flujo magnético

entonces:

$$B(H) - B_0(H) = \int_0^t \frac{V(H) dt}{A}$$

donde:

B = densidad del flujo magnético, T
 B₀ = densidad del flujo magnético al tiempo cero, T
 H = intensidad del campo magnético, A/m
 V = voltaje
 A = área transversal, m²

Hay dos tipos de separadores magnéticos : el separador tipo holding y el de tipo suspendido.

Hay dos configuraciones de los separadores tipo holding, estos son el de tambor y el de banda como se indica en la figura 3.7.

Para el separador tipo holding de tambor, el cilindro horizontal rotativo es fabricado por un material no magnético tal como latón o acero inoxidable. Este tambor rotativo rodea a un banco magnético el cual tiene la misma forma del tambor. Como los residuos fluyen sobre el tambor, el material magnético se colecta y se lleva a un punto debajo donde hay un tope, donde éste mueve la influencia del campo magnético y el material se desecha fuera del tope. Los materiales no ferrosos caen directamente fuera del tambor.

Los separadores de tambor tienen un rango en tamaño de 30 cm a 150 cm de ancho aproximadamente y de 30 a 75 cm de diámetro y se mueven a una velocidad de 50 m/min a 250 m/min. La potencia requerida generalmente no excede de 3.7 a 7.5 KW.

En el separador tipo holding de banda, se alimenta una capa delgada de RSM directamente, la cual se colecta sobre la superficie. La gravedad provoca que ambos materiales magnéticos y no magnéticos lleguen al tope de la banda. Como la banda se mueve, los materiales ferrosos son atraídos hacia la cabeza de la polea y ambos materiales caen y se reciben en tolvas separadas.

En el separador tipo holding de banda, el diámetro de la polea puede tener de 30 a 60 cm, una banda de 2.50 m de ancho y una velocidad de 2.5 a 7.5 m/min. La potencia requerida es menor de 1 KW para sistemas pequeños y de 7 a 15 KW para los más grandes.

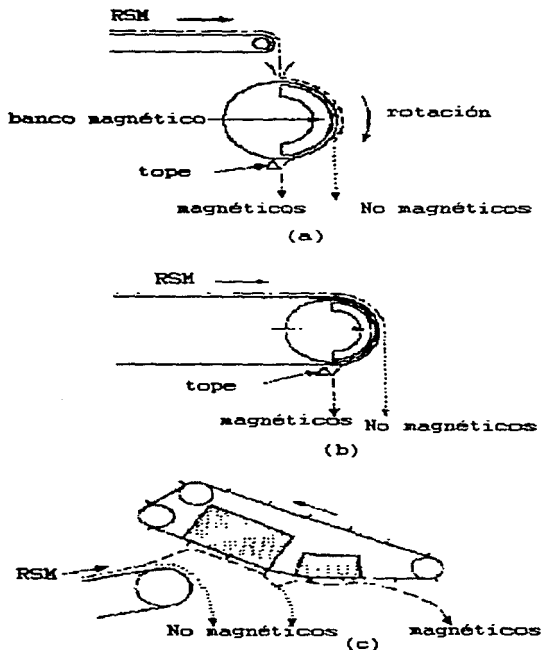


Fig. 3.7 Separadores magnéticos:

- a) tipo holding de tambor;
- b) tipo holding de banda;
- c) separador tipo suspendido.

Otro tipo de separadores usados en aplicaciones de RSM son los separadores de tipo suspendido. En esta operación, la alimentación no se pone en contacto directamente con la superficie colectora, sino que la alimentación se lleva a través de un campo magnético relativamente fuerte el cual eleva el material ferroso y se pega a la banda por medio de la fuerza del campo. En la figura 3.7 se ilustran los detalles de este separador.

3.1.6. SEPARACION ELECTROSTATICA (17)

Las partículas cargadas bajo la influencia de fuerzas electrostáticas obedecen a leyes de atracción y repulsión.

La ley de Coulomb describe la fuerza de atracción entre partículas con carga eléctrica opuesta, (o su equivalente, la repulsión entre partículas con la misma carga):

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

donde:

q_1, q_2 = cargas de dos partículas

r = distancia entre las partículas, m

ϵ_0 = constante de permitividad = $8.854 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{Nm}^2$

La premisa de la separación electrostática es que ciertos materiales pueden adquirir carga eléctrica y pueden separarse al ser atraídos por un electrodo con carga opuesta, (o ser repelidos por un electrodo que tenga igual carga). Ver la figura 3.8.

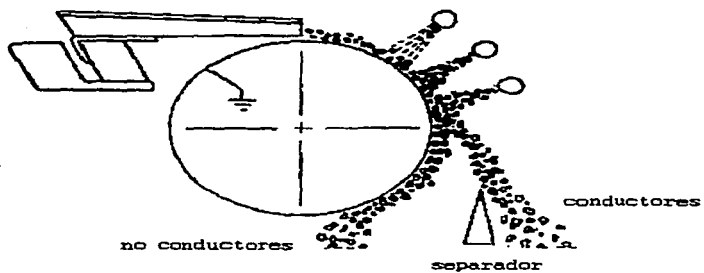


Fig. 3.8 Separador electrostático.

3.1.7. SEPARACION POR COLOR ⁽¹⁾

La separación óptica ha encontrado una aplicación en la clasificación de vidrio en base a su color, y podría encontrarse una aplicación similar en la separación de RPPC de diferente color.

3.2. PROCESOS DE RECUPERACION DE MATERIALES

Primeramente se hablará de la pepena, forma muy rudimentaria de llevar a cabo la recuperación de materiales, principalmente en los países subdesarrollados.

3.2.1. PEPENA

La pepena consiste en seleccionar, clasificar y vender los materiales que contienen los RSM que llegan a los tiraderos y que son demandados para su industrialización.

El pepenador trabaja generalmente en tiraderos, basureros al aire libre y en rellenos sanitarios. Se ocupa de pepenar o espulgar los RSM para separar los objetos y materiales reutilizables o reciclables que posteriormente vende a intermediarios.

Los pepenadores conforman un grupo social organizado con trabajo productivo y útil a la sociedad, trabajo que, generalmente, no sólo no les es reconocido, sino que es rechazado por otros estratos, por ello es muy difícil que un pepenador se integre a otro tipo de trabajo.

Las comunidades de los pepenadores tienen su propia estratificación social manipulada y controlada por sus líderes. ⁽²⁾

El sistema de trabajo puede resumirse en lo siguiente:
Los camiones del sistema de limpia, llegan al tiradero, y después de ser pesados en la báscula de entrada (hay tiraderos en donde no hay báscula) depositan su contenido (aproximadamente tres toneladas).

Un representante de su líder, selecciona a las familias para que separen los materiales. En el interior de cada familia existe una organización específica. Cada miembro recolecta materiales diferentes: los niños se encargan de las latas de aluminio, hueso, plástico, papel, chácharas, vidrio, y residuos de hospital; los hombres recolectan escasamente algunos de los materiales como vidrio, metales, cartón, papel y llantas, aunque su principal función consiste en llevar al pesadero los materiales ya empacados. Este trabajo es eminentemente artesanal. Las únicas herramientas con las que cuenta son bieldos (trinchas largos para mover paja), ganchos elaborados por ellos mismos, y sus manos.⁽⁶⁾

Una vez seleccionados los materiales, se empaacan y se llevan a los pesaderos, sitio donde están las básculas, se pesan y se le paga directamente al pepenador.

La pepena de un viaje promedio de un camión recolector (tres toneladas) requiere de la aplicación de diez horas de trabajo de cinco personas en promedio.

Los ingresos de los pepenadores en los tiraderos son sumamente bajos, ya que dependen de los precios que son pagados los materiales que seleccionan, por lo que en los mejores casos, sus ingresos representan diariamente tan solo una fracción del salario mínimo vigente.

Los materiales de los RSM que son vendidos a las industrias para su reciclaje, tienen valor en el mercado gracias a la fuerza de trabajo que le aplican los pepenadores.

Las condiciones de vida dentro de los tiraderos son infrahumanas, hecho que se refleja en muertes prematuras, enfermedades por desnutrición e intoxicaciones y deterioro físico.

Tomando como base los estudios realizados por diversas dependencias (Sedesol, Banobras, gobiernos locales, etc.) se estimó una población de 25 000 personas dedicadas al trabajo informal de selección de materiales de los RSM (pepena). Sin embargo, dicha actividad tiene una baja productividad debido principalmente, a que la comercialización de éstos está vinculada con la localización de las plantas que los procesan lo cual representa una gran diversidad en los precios de los mismos.⁽¹⁰⁾

Actualmente, en los tiraderos del Distrito Federal, se pepena PET, material con el que están hechas las botellas que contienen bebidas carbonatadas (refrescos), PEAD, PEBD, PP y PVC y los venden a industrias recicladoras.⁽¹⁰⁾

3.2.2. PROCESO BLACK-CLAWSON ⁽¹¹⁾

El producto principal del proceso Black-Clawson es la pulpa de papel. La figura 3.9 indica el diagrama de flujo del proceso.

Los residuos se introducen a un hidropulperizador, donde con un 95 a 97% de agua se forma un lodo que contiene papel, residuos alimenticios, plásticos, vidrio y piezas pequeñas de metal, que se extraen del fondo de la pulperizadora a través de pequeñas aberturas. Los objetos grandes se expulsan a través de una abertura cercana al fondo y se separan por medio de un elevador de cangilones continuo.

La descarga del elevador se lava en un tambor rotatorio y

los materiales ferrosos se remueven mediante un separador magnético.

El lodo de la pulperizadora se bombea a través de un ciclón para separar los materiales inorgánicos.

El residuo rechazado contiene cerca del 80% de vidrio y algo de aluminio.

El siguiente paso es reducir a fibras cualquier papel que hasta aquí no ha sido desintegrado y se criban en tamices con orificios de 1/8" con un plato rotatorio de alta velocidad que gira sobre él para separar el plástico, madera y cuero.

Los objetos mayores de 1/16" se separan en una segunda etapa de cribado mediante un lavado centrífugo, eliminándose la tierra y pequeñas astillas de madera.

Después de este lavado el lodo o pulpa se bombea a una criba inclinada con ranuras horizontales a través de las cuales cae el 85% de agua, arrastrando pequeñas fibras cortas, detritos, arcillas, y partículas de comida. A las fibras recuperadas se les elimina el agua en dos etapas.

El equipo de la primera etapa es un espesador que consiste en un cilindro perforado, colocado con una inclinación de 60° y dentro del cual gira un tornillo sinfín.

El tornillo transporta la pulpa a través del cilindro perforado y descarga el 10% de la pulpa en una prensa de cono donde se elimina el agua y se concentra un 40% de sólidos.

La desventaja del sistema es una gran demanda de energía y la necesidad del tratamiento de aguas residuales.

los materiales ferrosos se remueven mediante un separador magnético.

El lodo de la pulperizadora se bombea a través de un ciclón para separar los materiales inorgánicos.

El residuo rechazado contiene cerca del 80% de vidrio y algo de aluminio.

El siguiente paso es reducir a fibras cualquier papel que hasta aquí no ha sido desintegrado y se criban en tamices con orificios de 1/8" con un plato rotatorio de alta velocidad que gira sobre él para separar el plástico, madera y cuero.

Los objetos mayores de 1/16" se separan en una segunda etapa de cribado mediante un lavado centrífugo, eliminándose la tierra y pequeñas astillas de madera.

Después de este lavado el lodo o pulpa se bombea a una criba inclinada con ranuras horizontales a través de las cuales cae el 85% de agua, arrastrando pequeñas fibras cortas, detritos, arcillas, y partículas de comida. A las fibras recuperadas se les elimina el agua en dos etapas.

El equipo de la primera etapa es un espesador que consiste en un cilindro perforado, colocado con una inclinación de 60° y dentro del cual gira un tornillo sinfn.

El tornillo transporta la pulpa a través del cilindro perforado y descarga el 10% de la pulpa en una prensa de cono donde se elimina el agua y se concentra un 40% de sólidos.

La desventaja del sistema es una gran demanda de energía y la necesidad del tratamiento de aguas residuales.

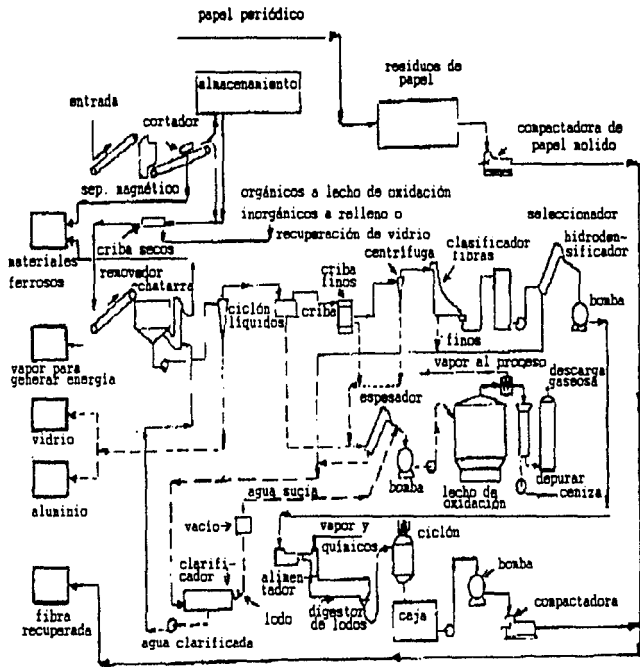


Fig. 3.9 Diagrama de flujo Black-Clawson para la separación de Residuos Sólidos Municipales.

3.2.3. PROCESO ENADIMSA (19)

En la figura 3.10 se puede ver el método de separación desarrollado por ADARO S. A. de España. Mediante técnicas de trituración y separaciones neumáticas, magnéticas y mecánicas es posible la clasificación de todos los materiales. Este método asegura la separación de los RPPC del resto de los componentes de los RSM, algunos de los cuales (metales, magnéticos, etc.) hacen por sí solo rentables a las plantas de separación y tratamiento de los RSM.

La fracción ligera (papeles, cartones, película plástica, botellas de plástico, textiles y materia orgánica fina), se separa mediante una campana de aspiración y un ciclón. Los residuos orgánicos putrescibles se separan en un trómel (criba de tambor rotatorio), los rechazos de éste se humedecen inmediatamente mediante un sistema de rociado antes de pasar al trómel dilacerador. Los papeles y textiles que no se han alterado se someten a continuación a una clasificación neumática que separa entre sí las películas plásticas y las botellas de plástico.

El diagrama del proceso puede considerarse como el de una instalación de separación neumática, acompañada de las operaciones básicas de trituración y separación magnética y mecánica complementarias.

El proceso se inicia con la descarga de los RSM en una tolva-plataforma, donde por un sistema de cintas se alimenta un molino de cadenas que consta de una carcasa en la que van alojados dos ejes provistos de cadenas y que giran en sentidos opuestos. En este molino se desgarran y abren las bolsas de plástico, en las que se depositan los residuos, se reducen los materiales más voluminosos y se rompen los componentes frágiles como vidrios, escorias y materiales

cerámicos.

El material no absorbido por captación neumática, pasa a una clasificación mecánica por medio de una criba giratoria de 65 mm de malla.

Los tamaños superiores de 65 mm se someten a separación magnética por medio de un separador tipo "OBER-BAND", obteniéndose hierro y envases estañados.

El rechazo de esta separación se compone de plásticos, papel, cartón y textiles no recogidos en la primera captación neumática.

Los tamaños menores de 65 mm (tapas de botella, vidrio y materia orgánica) se someten a una clasificación magnética en un separador de tambor, recogándose las tapas de botellas, el resto se tamiza en una criba giratoria de 15 mm de luz.

Los materiales menores de 15 mm se someten a una clasificación gravimétrica, en una criba hidráulica, en la que se concentran dos tipos de materiales:

- 1) Inorgánicos menores de 15 mm (vidrio, cerámica y escoria)
- 2) Orgánicos menores de 15 mm.

La fracción ligera, procedente de la primera captación neumática, se somete a una separación por vía semihúmeda para la recuperación de los plásticos y la obtención de productos celulósicos.

La fracción inorgánica se depura por flotación obteniéndose un concentrado de vidrio de alta calidad. Ver la figura 3.11.

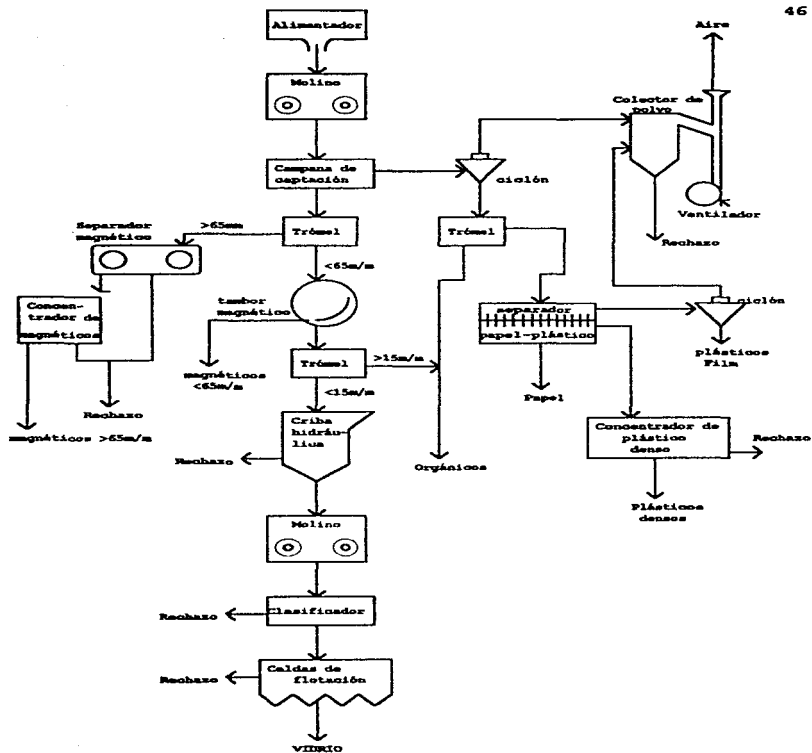


Fig. 3.10 Proceso ENADIMSA.

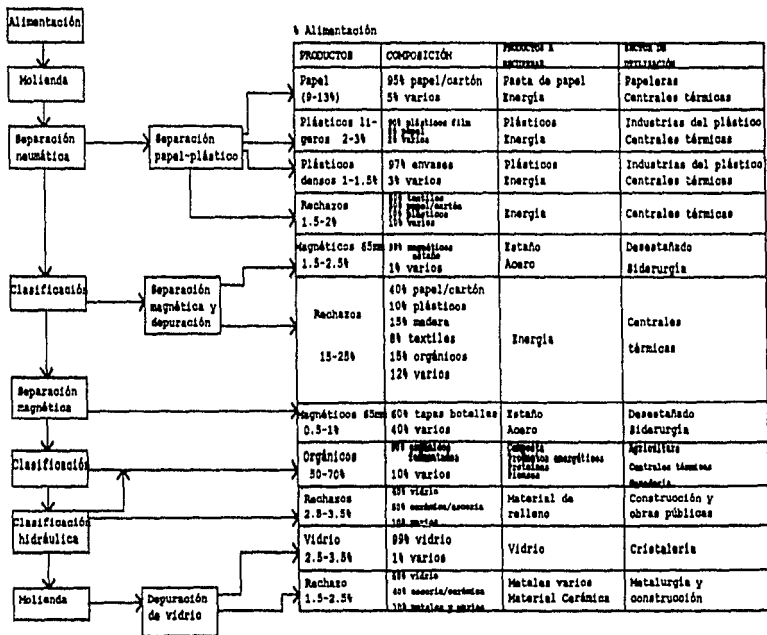


Fig. 3.11 Proceso para el tratamiento de R.S.M. (ENADIMSA) Composición y alternativas de utilización.

3.2.4. PROCESO FLÄKT (1)

La planta experimental diseñada y construida por A. M. Svenska Fläktfabriken es un buen ejemplo de un proceso de separación en seco. La figura 3.12 es un esquema del mismo.

La alimentación se prepara en una desfibradora, la cual rompe las bolsas de plástico, en las que están empacados los RSM, exponiendo así el material, combinada con una criba la cual separa los artículos excesivamente grandes.

El material se remueve del tambor por un alimentador rotatorio y se introduce a un clasificador de aire tipo zigzag. El aire circula en un circuito cerrado, y el rotor del ventilador proporciona el calor que ayuda a secar el material que está siendo separado.

La fracción ligera se descarga a través de un ciclón sobre otro alimentador rotatorio y dentro de un segundo cortador para obtener un tamaño de partícula más homogéneo y extraer las impurezas que hayan quedado atrapadas. Fig. 3.13.

Esta fracción está formada por papel húmedo, textiles y algunas películas de plástico. Las impurezas finas consisten en madera, arena, polvo, etc., y se separan en una segunda criba de tambor rotatorio.

El propósito de la segunda etapa es purificar el papel y hacerlo biológicamente estable. Esta purificación se logra por medio de secado con aire caliente. Bajo la acción de calor, las películas de plástico se contraen y pueden separarse aerodinámicamente. Fig 3.14.

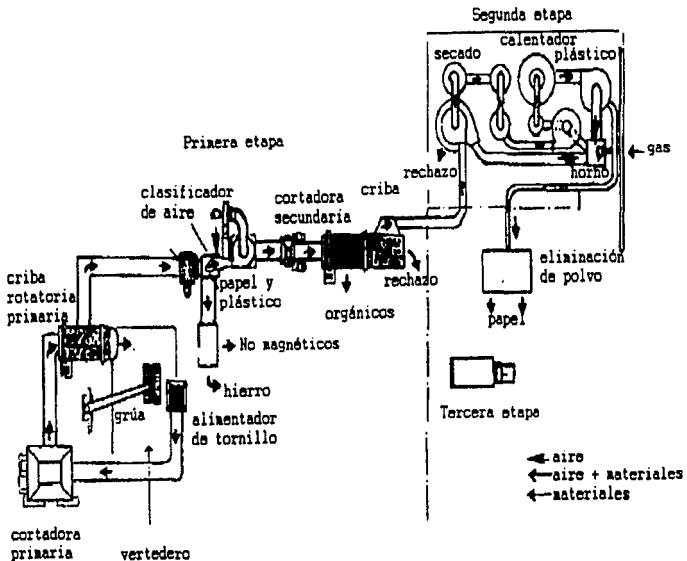


Fig. 3.12 Sistema de separación seco Flakt.

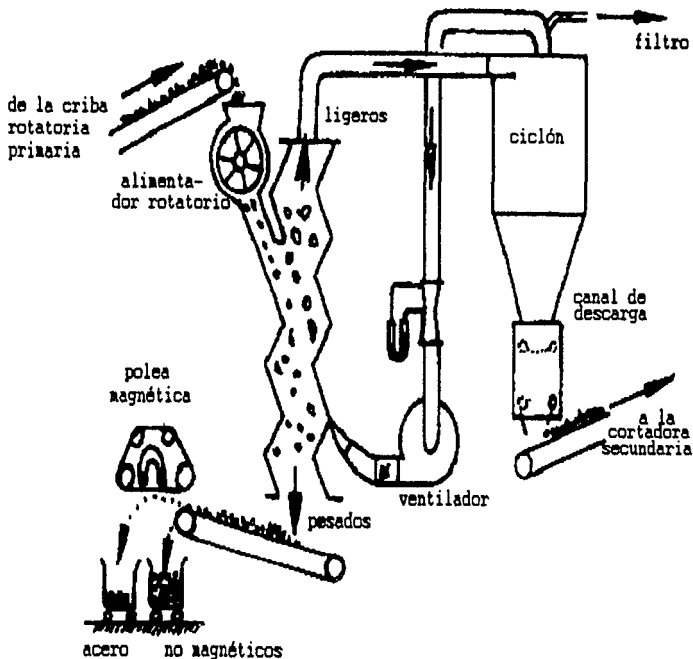


Fig. 3.13 Arreglo de un clasificador de aire vertical.

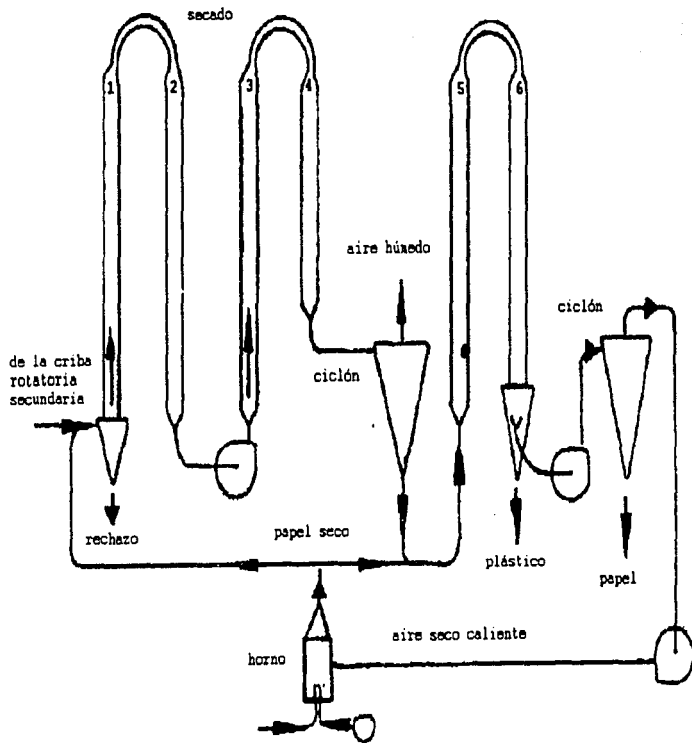


Fig. 3.14 Segunda etapa: secado de papel con aire caliente.

3.2.5. PROCESO ALEMÁN TNO⁽²⁰⁾

Un diagrama de flujo del proceso alemán TNO, utilizado desde 1978, se muestra en la figura 3.15. Este proceso opera 15-20 ton/hr y está diseñado para recuperar metales, plásticos y papel de los RSM utilizando varias operaciones.

Del total de RSM se recupera el 3% en metal, el 8% en plástico y el 15% en papel. El plástico recuperado, derivado de la fracción ligera del separador de aire, lo compactan para formar "pacas de plástico", las que venden a las empresas que fabrican productos con plásticos reciclados.

3.2.6. PROCESO NORUEGO SINTEF⁽²⁰⁾

Un proceso desarrollado por SINTEF en Noruega se indica en la figura 3.16, es muy similar al proceso TNO.

Primero, cortan los residuos, los criban y después los pasan a un separador de aire de zigzag para separar las fracciones ligeras de las pesadas. El proceso SINTEF toma la fracción ligera del separador de aire y la pasa a un simple tanque de lavado de 250 litros de agua.

Posteriormente, se utiliza el método de flotación para separar los componentes de la fracción ligera, obteniéndose poliolefinas en la superficie, y PVC y otros plásticos, cuyas densidades son mayores a la del agua, en el fondo.

3.2.7. SISTEMA DE COLECTA ALEMÁN AKW⁽²⁰⁾

La planta de reciclado AKW ha funcionado desde 1988 y emplea tres diferentes sistemas de colecta que se indican en la figura 3.17.

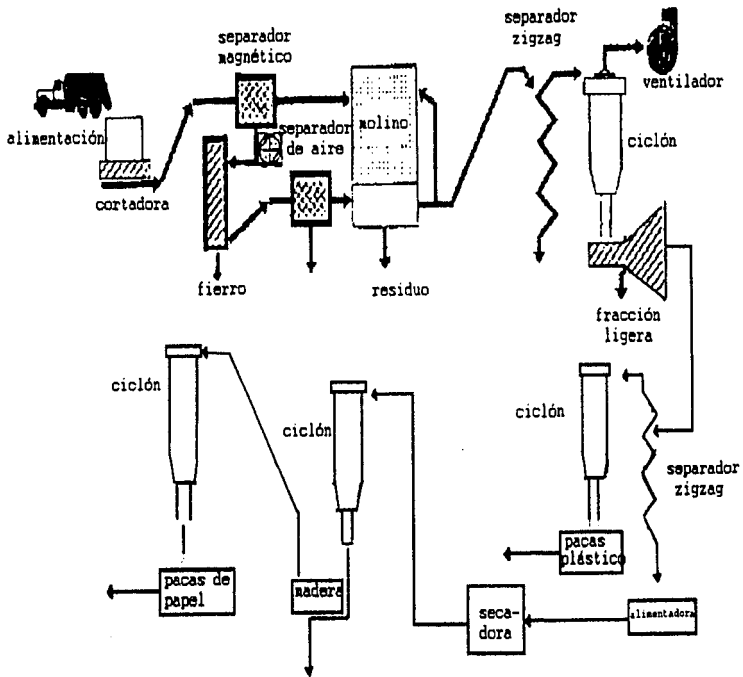


Fig. 3.15 Proceso alemán TNO.

1) En lugares muy transitados como centros comerciales y de diversión, existen grandes recipientes marcados para vidrio, plástico y papel, donde la gente deposita sus residuos, y posteriormente se llevan a las "Instalaciones de Recuperación de Materiales" (IRM).

2) La gente tiene que depositar en un gran "bote verde" residuos de papel, metal y plástico, facilitándose así la recuperación de los materiales.

3) Este sistema requiere que la gente haga un esfuerzo por separar sus residuos ya que se usan tres botes, donde se colocan los materiales.

Estos sistemas han sido adoptados en varias partes del mundo y requieren que se lleve a cabo una separación manual en una planta de reciclado.

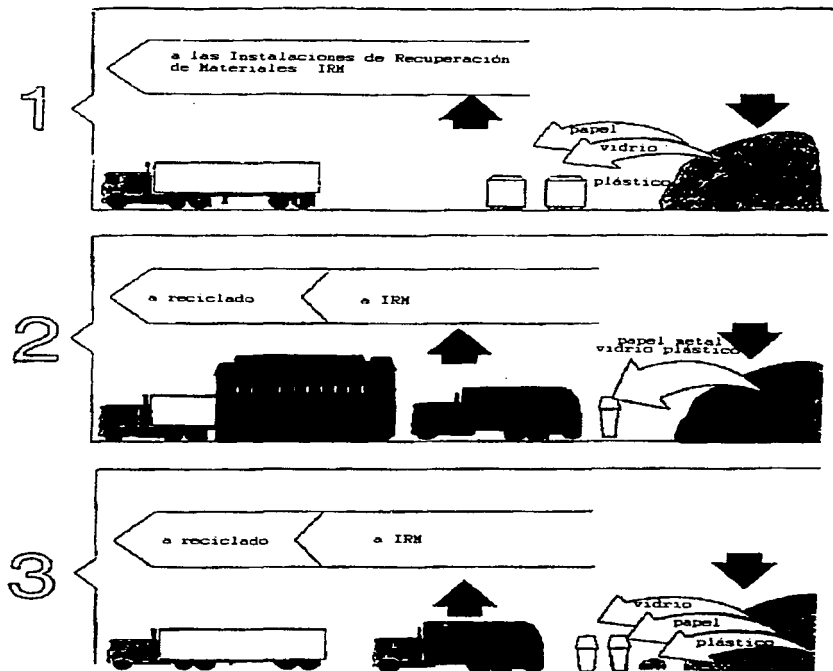
3.2.8. PLANTAS DE SELECCION Y TRATAMIENTO

En el Distrito Federal, en agosto de 1994, arrancaron tres plantas de selección de RSM que contribuyeron a mejorar las condiciones de vida de algunos pepenadores.

Si operan las tres plantas a su capacidad total, se logra separar una cantidad equivalente al 40% del total de los materiales reciclables de los RSM, pues las plantas están diseñadas para recuperar hasta el 13% de los residuos, es decir, 600 ton/día de las 4,500 ton/día que ingresan.^[21]

Al presente y en el futuro inmediato, las plantas servirán para mejorar las condiciones de vida de los pepenadores y para poder cerrar, sin complicaciones sociopolíticas, el tiradero de Santa Catarina.

Fig. 3.17 Sistema de colecta AKW.



Se requiere elevar la capacidad de todas las plantas y construir otras para lograr un incremento de la cantidad de materiales reciclables recuperados.

Planta de Selección y Tratamiento de Residuos Sólidos de San Juan de Aragón: aquí se recupera un 13% y laboran 600 expepenadores del antiguo tiradero de Santa Fe parte baja. Rescatan materiales, los empacan y venden a las empresas. No hay niños ni viviendas como los hay en los tiraderos a cielo abierto. Se trabaja con buenas condiciones de higiene y seguridad en turnos de seis horas.⁽⁹⁾

Planta de Selección y Tratamiento de Residuos Sólidos de Bordo Poniente: aquí trabajan otros 600 expepenadores del antiguo tiradero Santa Fe parte alta, y las condiciones de empleo son similares a las de la otra planta.⁽⁹⁾

Planta de Selección y Tratamiento de Residuos Sólidos de Santa Catarina: trabajan expepenadores del mismo lugar y las condiciones de trabajo son semejantes a las anteriores.

Los RPPC seleccionados, los separan por tipo de material, los compactan y forman pacas que venden directamente a empresas que reciclan estos materiales.

3.3. PROCESOS DE SEPARACION ESPECIFICOS PARA RPPC

3.3.1. SEPARACION DE MEZCLAS DE PAPEL/PLASTICO

Las mezclas de plásticos y papel son productos comunes en las plantas de separación de RSM en los procesos en seco.

El principal problema en la separación de estas mezclas deriva de la similitud aerodinámica de la película de plástico y el papel.

Tres propiedades se han aplicado como base de métodos de separación: A) calor, B) humedad, C) cargas eléctricas.

A) Procesos que involucran la aplicación de calor: (1)

Hay dos procesos que involucran la aplicación de calor como un medio para cambiar las características de los plásticos.

La figura 3.18 ilustra un "cilindro caliente", este dispositivo de separación consiste de un cilindro cromado calentado eléctricamente, rodeado por un tambor vacío rotatorio adaptado con paletas que aseguran una agitación alrededor del cilindro caliente. El tambor y el cilindro caliente rotan en direcciones opuestas.

En el fondo, una rasqueta está en contacto con el cilindro caliente y conectada a un canal. El material se alimenta al tambor a través de un tubo de hojalata insertado en la entrada. Los materiales de plástico comienzan a entrar en contacto con el cilindro caliente se funden y son removidos por la rasqueta.

Con este proceso se puede lograr un 90% de separación de plástico.

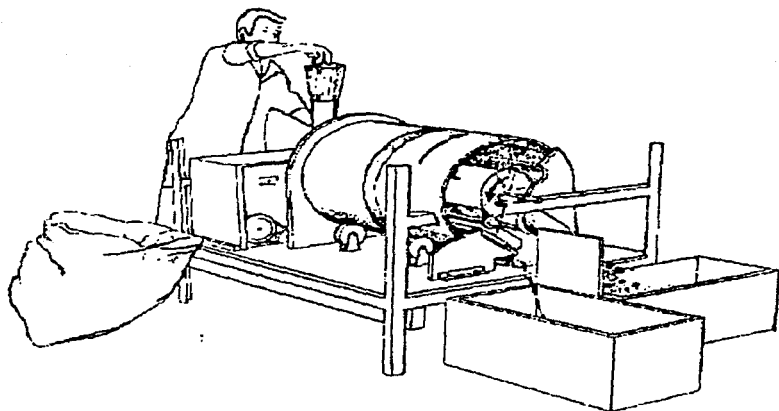


Fig. 3.18 Método de separación del "cilindro caliente"

El otro proceso está basado, en la reducción del área específica de las películas plásticas debido a la acción del calor. En la figura 3.19 se muestra este proceso.

Una mezcla de plásticos y papel se depositan en una banda transportadora, la cual lleva el material a una zona caliente, se utiliza un deshidratador agrícola como calentador. La mezcla se transporta en una corriente de gas caliente generada por el calentador, la cual provoca una contracción de la película plástica reduciendo el área superficial. La mezcla se descarga a un ciclón y luego hacia un transportador que alimenta a un separador de aire.

El aire tirado a través del separador conduce los desechos de papel hacia fuera por un ducto de salida mientras que las partículas termoplásticas caen al fondo del clasificador y se descargan. Con este método se puede lograr una separación casi completa.

B) Proceso que involucra la aplicación de humedad:¹¹⁾

Un proceso de separación húmedo patentado por Black- Clawson Inc., se aplica para recuperar plásticos de la fracción ligera obtenida de la planta de separación de RSM en seco.

La figura 3.20 ilustra la aplicación a una separación húmeda. Un transportador (1) entrega los residuos a una desfibradora (2), después se transfieren a un clasificador de aire. La fracción ligera del clasificador de aire comprende aproximadamente 60% papel y 20% plásticos y el resto residuos de vegetación y trapo viejo.

La fracción ligera se transporta a una pulperizadora (3) equipada con un rotor (4) y un plato de extracción (5) que tiene pequeñas perforaciones. La pulpa de papel es capaz de pasar a través de las perforaciones. Las partículas

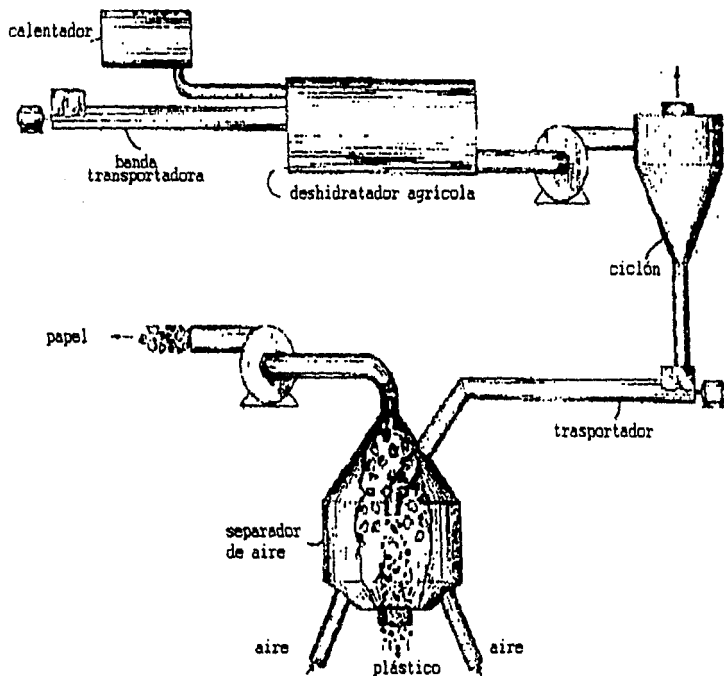


Fig. 3.19 Proceso de separación basado en la reducción del área específica.

plásticas retenidas en el tubo, se descargan através de un tubo de carga (6) provisto de un válvula (7). La fracción rica en plástico se transfiere a un dispositivo de secado (8) y luego a un clasificador de aire (9).

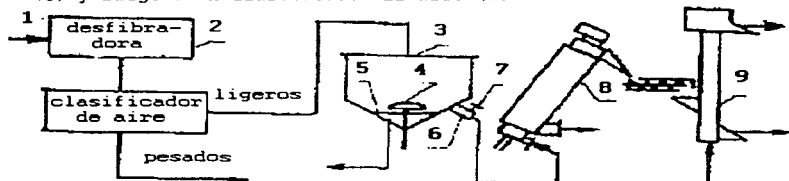


Fig. 3.20 Proceso de separación húmedo Black-Clawson.

C) Proceso que involucra la aplicación de cargas eléctricas: (11)

La figura 3.21 es el esquema de un separador electrodinámico. La mezcla de plásticos y papel se alimenta al separador por un alimentador vibratorio (2). El material cae a un molino de tambor rotatorio (3) y se lleva a una corona formada entre un electrodo (1) y el tambor. El papel tira hacia el electrodo, mientras que los plásticos se adhieren al tambor. Como el tambor rota, los plásticos se separan en el fondo por una rasqueta.

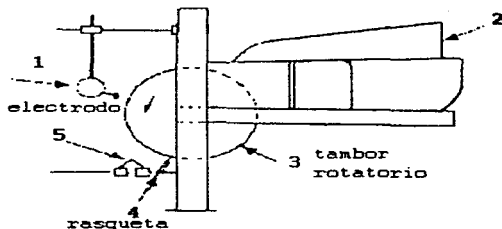


Fig. 3.21 Separador electrodinámico.

3.3.2. SEPARACION DE PLASTICOS EN TELAS RECUBIERTAS DE PVC

Se dispone de una gran cantidad de desechos de telas recubiertas de PVC, principalmente en compañías involucradas en su manufactura. Todo proceso desarrollado para la separación de PVC de las telas involucra la extracción del polímero con algún disolvente.

La figura 3.22 es un diagrama de flujo del proceso desarrollado por Fiber Process Inc.⁽¹⁾ Los materiales llegan a la planta y se cortan en tamaños adecuados para clasificarlos por colores manualmente. El material clasificado se seca y se carga a un recipiente enchaquetado el cual se cierra herméticamente y se introduce un gas inerte. El recipiente se llena con un disolvente tal como tetrahidrofurano (THF), y la mezcla agitada se calienta a una temperatura ligeramente debajo del punto de ebullición del disolvente. La resina se disuelve en el disolvente y la solución se transfiere a un tanque de almacenamiento.

Se necesitan tres lavados para completar la extracción. El disolvente atrapado en las fibras se separa con nitrógeno calentado. Las fibras secas se embalan y se envuelven para cargamento. La solución de polímero se filtra para remover pigmentos, cargas y otros contaminantes y se alimenta a un preconcentrador usualmente un evaporador de película. La producción contiene de 30% a 40% de sólidos. El secado final se lleva a cabo a vacío en un evaporador de película fina. La secadora produce una resina de PVC granular e incolora.

El disolvente se condensa y regresa al proceso. Debido a que nunca se introducen condiciones extremas de calor se evita la degradación de la resina. Este proceso recupera el PVC completamente.

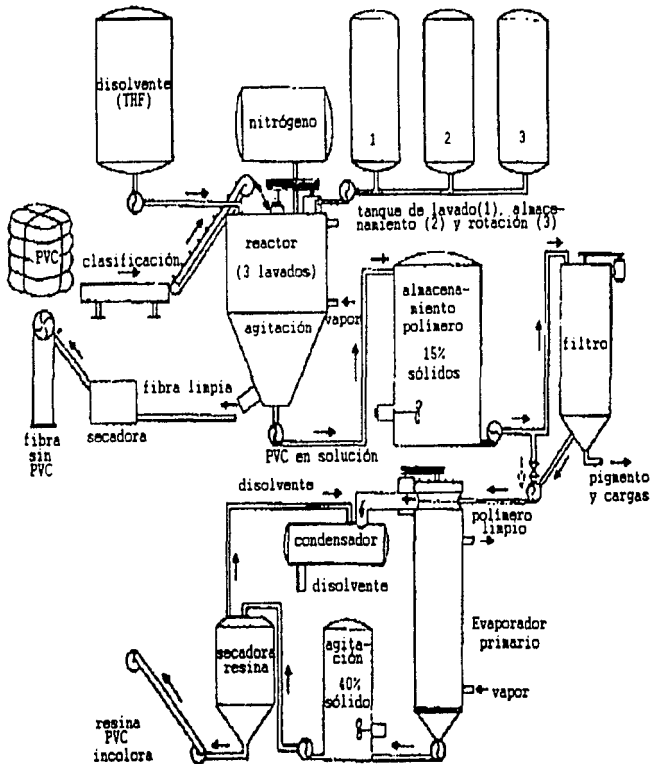


Fig. 3.22 Diagrama de flujo del proceso de Fiber Process Inc.

Hay otro proceso patentado por Hafner⁽¹⁾ que permite recuperar el polímero puro y aditivos, el diagrama de flujo se indica en la figura 3.23.

El disolvente se precalienta y se agrega a la alimentación. La mezcla se agita y se mantiene a elevada temperatura hasta que el PVC se disuelve, las fibras de la tela se separan por filtración y la solución se mezcla con un líquido que no disuelve al PVC pero completamente miscible con el disolvente, así el PVC precipita.

Los plastificantes permanecen en la solución, el polímero precipitado se filtra, se lava con un no disolvente y se seca. El filtrado contiene disolvente, no disolvente, plastificantes y otros aditivos. La solución se separa por destilación fraccionada.

El disolvente y el no disolvente se separan y retornan al proceso.

El residuo contiene plastificantes que se pueden reusar directamente después de lavarlos y secarlos. El proceso puede ser usado para separar el polímero de PVC de telas recubiertas de PVC o para separar polímeros de una mezcla que contenga PVC.

3.3.3. SEPARACION DE MEZCLAS DE PLASTICOS

Los RPPC forman mezclas de grupos genéricos de plásticos.

A continuación se mencionan algunos procesos que sirven para separar mezclas simples de dos o tres plásticos diferentes, pero su utilidad en la separación de una mezcla compleja de RPPC es dudosa. Hasta aquí ninguna de estas propuestas se han implementado a escala industrial.

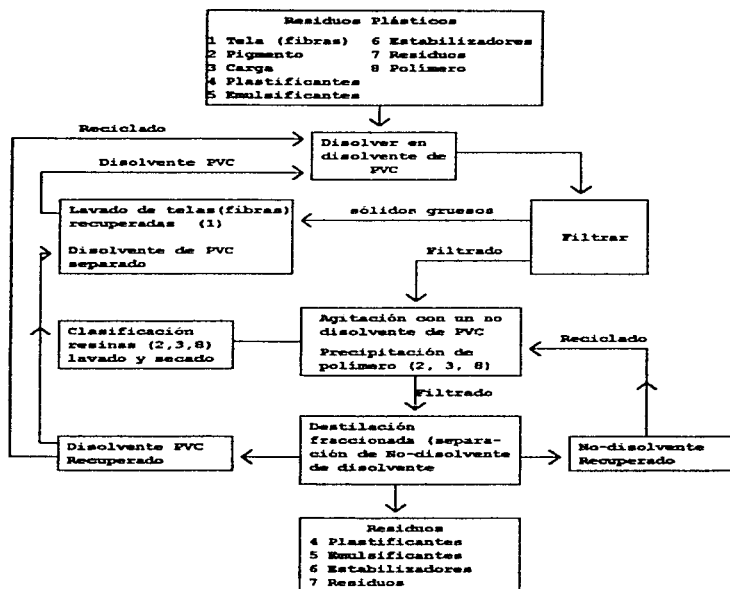


Fig. 3.23 Proceso Hafner de recuperación de PVC.

A) Separación en base a la densidad.⁽¹⁾

Hay tres principales componentes plásticos en los RPPC de los RSM: poliolefinas, PVC y PS, los cuales tienen diferentes densidades: las poliolefinas tienen de 0.90 a 0.96, el PVC de 1.22 a 1.38 y el PS de 1.05 a 1.06 g/cm³.

Estas diferencias en densidad pueden ser usadas para separar una mezcla de plásticos no formulados utilizando un separador de "flotar/hundir". El diagrama de flujo aparece en la figura 3.24.

La separación se logra usando cuatro líquidos: agua $d=1$ g/cm³, dos mezclas de agua y alcohol $d=0.93$ y 0.91 g/cm³, y una solución acuosa salina $d=1.20$ g/cm³.

La figura 3.25 indica el esquema de un separador hidráulico usando solamente agua como medio para separar una mezcla de plásticos cortados, en el cual las poliolefinas flotan y los otros componentes se hunden. La fracción pesada se transporta a una columna de elutriación donde el PS se acarrea a una corriente de agua y el PVC se hunde, es así como puede lograrse la separación.

B) Separación basada en la tensión superficial.⁽¹⁾

Aunque todos los plásticos son generalmente hidrofóbicos, sus características de mojado pueden ser ajustadas selectivamente por la adición de surfactantes. La figura 3.26 indica un típico conjunto de curvas de ángulos de contacto.

El ángulo de contacto decrece al aumentar la concentración del agente de mojado. Los efectos de estos agentes son completamente diferentes en plásticos diferentes. El efecto en PP es pequeño, pero el mojado incrementa en PE, PS y PVC.

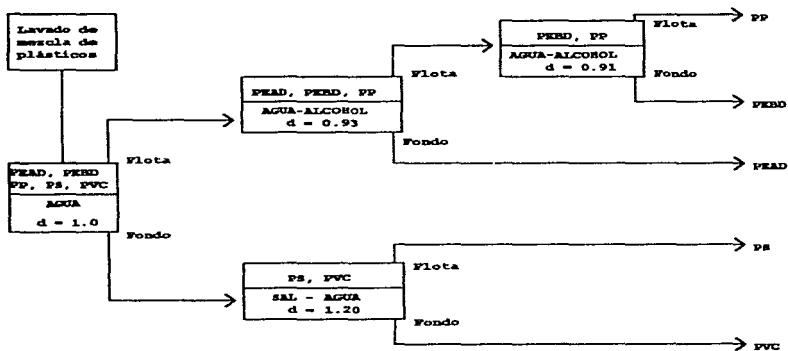


Fig. 3.24 Diagrama de flujo del separador "flotar / hundir".

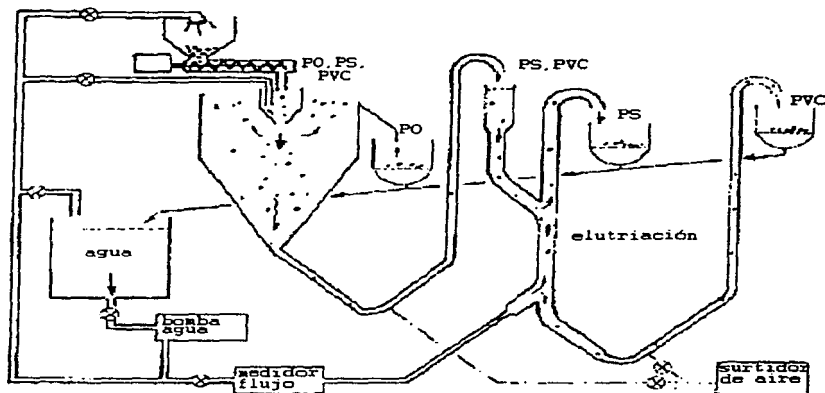


Fig. 3.25 Separador hidráulico.

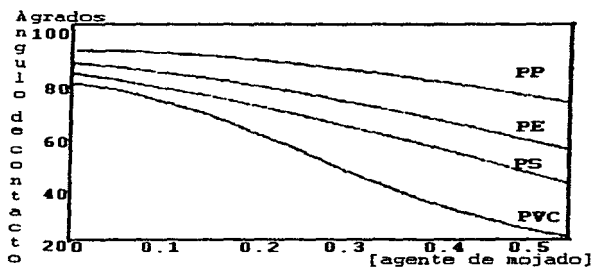


Fig. 3.26 Curvas de ángulo de contacto

La diferencia en las propiedades de mojado pueden ser usadas como una base de separación por el método de flotación.

Al igual que en los procesos minerales, la separación por flotación se logra adhiriendo burbujas de aire a partículas finamente granuladas, de 50 a 100 micras.

Una celda de flotación para plásticos debe satisfacer lo siguiente:

El tamaño de las burbujas de aire debe ser uniforme, es necesaria una agitación para evitar que las partículas grandes sedimenten y no debe haber flujo turbulento.

Saitoh et al⁽¹⁾, construyeron una celda que reúne estos requerimientos, en la cual se alimentaron varios tipos y formas de plásticos mezclados y se agregó un agente surfactante.

Después de varios minutos se adicionó un promotor apropiado de flotación y se introdujeron burbujas de aire. Al cabo de 10 minutos se logró la separación.

El esquema de un proceso continuo para separar una mezcla de dos plásticos se puede observar en la figura 3.27.

La alimentación se tritura a un tamaño de partícula de 10 mm, y se deposita, junto con agua y surfactante, dentro de un tanque. Después de unos minutos se agrega un promotor de flotación. Esta mezcla se introduce en celdas donde toma lugar la separación. Los materiales flotantes se sacan, se criban y se secan y el agua se recircula.

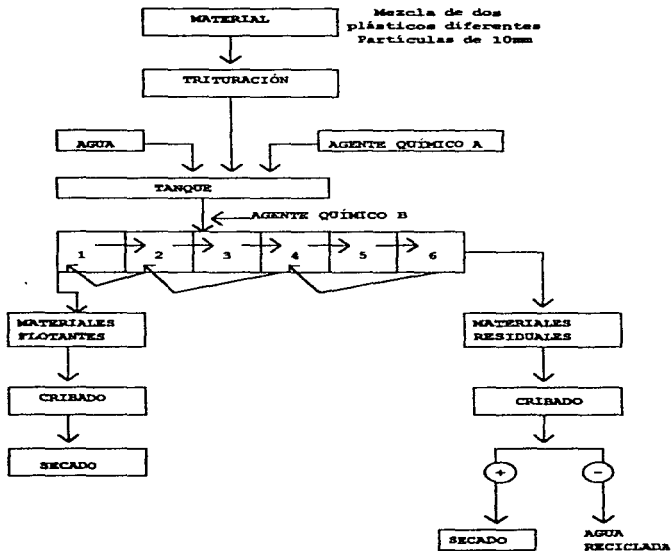


Fig. 3.27 Diagrama de flujo del proceso de separación por flotación.

C) Separación por disolvente. ⁽¹¹⁾

Los polímeros de alto peso molecular son raramente solubles en algún otro.

Cuando dos polímeros químicamente diferentes, se mezclan, usualmente forman fases separadas. Cuando un disolvente común se usa para disolver cada uno de los plásticos, tales soluciones no son miscibles. Si una mezcla de plásticos se disuelve en un disolvente, se forman varias fases que contienen soluciones de componentes casi puros.

Se estudió la separación de una mezcla de poliolefinas (PO), PS y PVC en varios disolventes, y se encontró que una mezcla de ciclohexanona y xileno hacen un sistema disolvente eficiente. La efectividad de este proceso está influenciada por los siguientes factores:
composición de los disolventes, temperatura, tipo de residuos en la alimentación, y relación disolvente/alimentación.

D) Separación de botellas de PVC de otros plásticos. ⁽¹²⁾

La separación de botellas de PVC de otros plásticos en programas de separación se ha convertido en necesaria, debido a los efectos adversos que producen pequeñas cantidades de PVC, ya que se puede formar HCl que corroe las máquinas de extrusión.

Se llevó a cabo una investigación en B. F. Goodrich y en el Centro de Investigación de Reciclado de Plásticos (Center for Plastics Recycling Research, CPRR) de la Universidad de Rutgers, para separar botellas de PVC, usando rayos x fluorescentes que detectan átomos de cloro en el PVC. También puede detectar otros cloros contenidos en polímeros

tales como policloruro de vinilideno (PVDC), el cual se usa en láminas y películas plásticas.

Aunque es posible la detección de pequeñas cantidades de cloro, los rayos x son débiles y no penetran etiquetas de papel. También la intensidad de los rayos decrece rápidamente con la distancia.

Debido a que el detector puede hacer lecturas de 0.005 segundos, se recomienda que la velocidad máxima de la cinta transportadora sea de 400 cm/seg, con un espacio de 10 cm entre las botellas, bajo estas condiciones se podrían analizar aproximadamente 10 botellas/seg.

E) Separación de PEAD de botellas de refrescos de PET.^[22]

El CPRR de la Universidad de Rutgers desarrolló un proceso para recuperar botellas de refresco. Su propósito es hacer hojuelas limpias de PET separadas de tapas, etiquetas, bases y adhesivos. Este proceso también proporciona hojuelas limpias de poliolefinas las cuales son principalmente de PEAD de las bases y PP de las tapas.

El esquema del proceso se muestra en la figura 3.28 y consta de los siguientes pasos :

- Colecta de RPPC;
- Clasificación;
- Molienda o corte de los RPPC en fragmentos de aproximadamente 3/8", acompañado de una clasificación por medio de aire para remover tierra, papel y otros "finos";
- Lavado de trozos de plástico con una solución jabonosa caliente con suficiente agitación para lograr un grado de

limpieza incluyendo la remoción de etiquetas, EVA y la desintegración de papel;

- Cribado y filtración de solución jabonosa para su reutilización;

- Enjuague de los fragmentos de plástico en un tanque de agitación;

- Separación en un hidrociclón para la obtención de componentes ligeros (bases de PEAD y etiquetas de PP) y de componentes pesados (PET y tapas de aluminio) con las siguientes densidades:

	g/cm ³
a) PEAD	0.96
b) PP	0.90
c) PET	1.29 a 1.40
d) Al	2.60

así a y b flotan en agua, mientras que c y d se hunden;

- Eliminación de restos de agua en una secadora rotatoria de alta velocidad;

- La corriente de componentes ligeros está lista para venderse o se puede adicionar un paso para separar PP de PEAD, o bien, la separación se lleva a cabo incrementando la velocidad de aire en la corriente ligera de la secadora de aire caliente, los fragmentos de PP son llevados afuera por el aire, sin embargo, los compradores quedan satisfechos al comprar PEAD con un 7 a 8% en peso de PP. Ellos pueden usar esta mezcla en una máquina de inyección, ya que sus temperaturas de fusión son muy cercanas:

PEAD 130 - 137 °C y PP 168 - 175 °C

Los componentes pesados se envían a un separador electrostático para remover el aluminio.

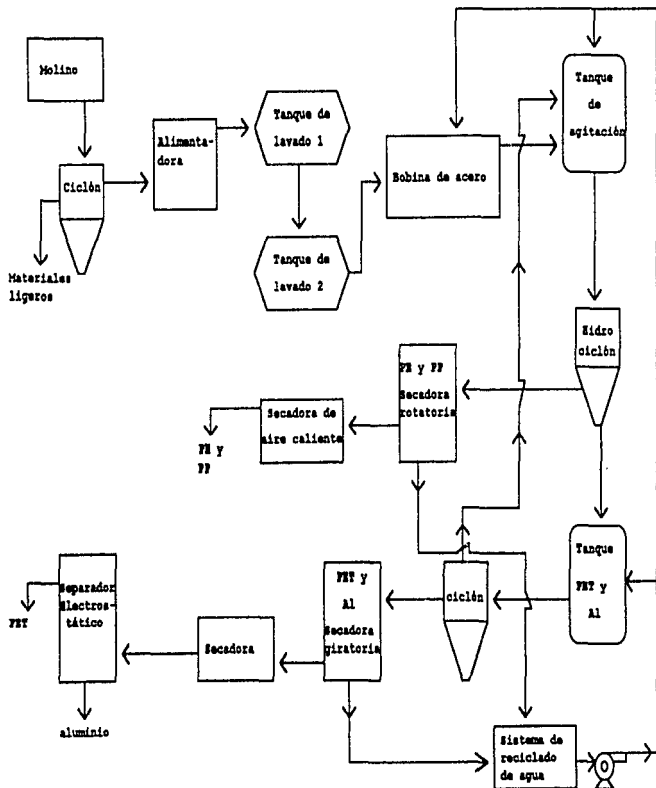


Fig. 3.28 Proceso para recuperar PET de botellas de refresco (Universidad de Rutgers).

F) Separación por medio de disolución selectiva.^[22]

La disolución selectiva involucra la separación de mezclas de plásticos a escala molecular. Hay dos métodos, uno consiste en usar un disolvente que disuelve todos los tipos de plástico y el segundo utiliza un disolvente que disuelve sólo un tipo de plástico pero no otros.

Primer método:

Disolución selectiva. Se necesita un disolvente y se usan una serie de temperaturas de solvatación, para extraer selectiva y secuencialmente plásticos de una mezcla.

La prueba consistió en colocar 25 kg de desechos plásticos (polímeros vírgenes) dentro de una columna con rejillas en cada extremo, recirculando por medio de una bomba 20 litros de disolvente.

Primero se obtiene un plástico de una simple extracción, el disolvente se separa por medio de una volatilización flash, y el plástico se recupera y se peletiza. El disolvente condensado se regresa a la disolución para remover el siguiente a mayor temperatura. Ver la figura 3.29.

La figura 3.30 muestra un aparato de volatilización flash experimental. Las concentraciones del plástico son de 5 a 10 % en peso, la presión en el intercambiador de calor es suficiente para prevenir la ebullición (10 - 40 atm) y la temperatura de 200 - 300 °C. La temperatura y la presión son dos variables que gobiernan la volatilización.

Se usaron porcentajes iguales de PEAD, PEBD, PET, PP, PS y PVC sin formular, el disolvente utilizado fue tetrahidrofurano y también se uso xileno. Dando una separación buena.

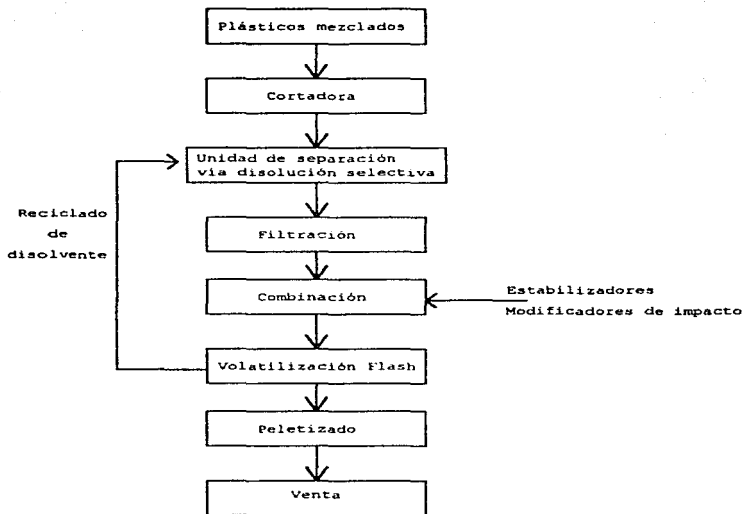


Fig. 3.29 Método de disolución selectiva (un sólo disolvente).

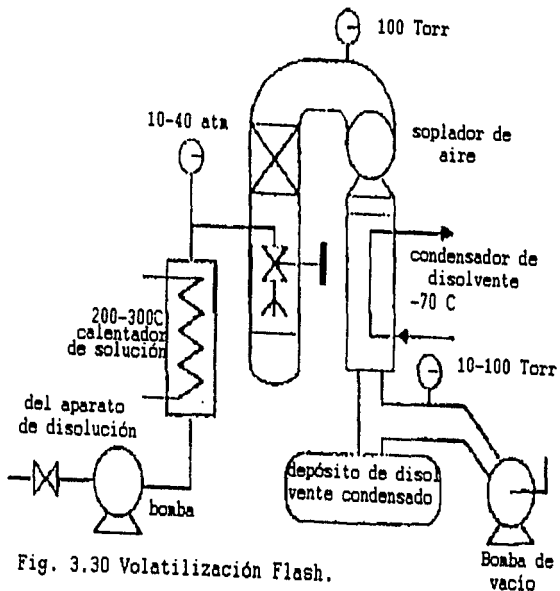


Fig. 3.30 Volatilización Flash.

ESTA TESTA NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Segundo método:

El diagrama de flujo de este proceso se dá en la figura 3.31.

Estado I. Los fragmentos secos se alimentan en tanque de lavado a 130 °C.

Estado II. El plástico pretendido se disuelve a alta temperatura, alrededor de 170 °C.

Estado III. Los materiales insolubles se remueven por medio de filtración, los materiales disueltos tales como tintas y catalizadores se separan por medio de adsorbentes.

Estado IV. El plástico se recupera por la disminución de la temperatura o por la adición de un no disolvente que causa la precipitación inmediata del plástico.

Estado V. Se enjuaga para eliminar las impurezas en el plástico precipitado.

Estado VI y VII) El disolvente N-metil-2-pirrolidinona (NMP) se separa y el plástico pasa por un proceso de extrusión y pelletizado.

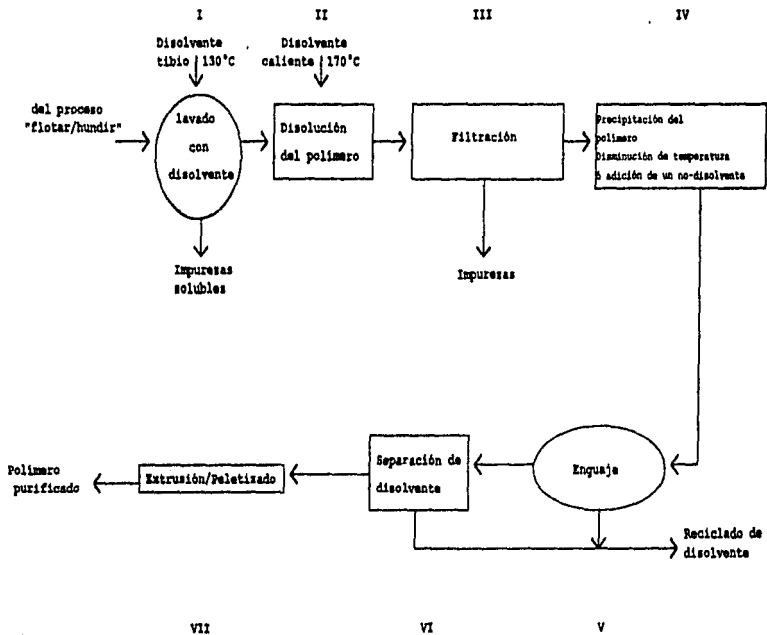


Fig. 3.31 Diagrama de flujo de disolución selectiva.

4. RECICLADO DE PLASTICO

4.1. RECICLADO PRIMARIO

El reciclado primario consiste en reprocesar plástico limpio y uniforme que forma parte de residuos industriales y que son separados antes de que se mezclen o ensucien. Pueden ser piezas defectuosas o mermas, éstas se separan de acuerdo con el tipo de material y se reciclan. Su reutilización es práctica, ya que estos artículos no han tenido contacto con el usuario o con los RSM y están libres de contaminación orgánica. Solamente los desechos termoplásticos pueden ser reprocesados directamente y se pueden usar solos o en algunas ocasiones, agregar plásticos vírgenes en diferentes porcentajes.⁽⁴⁾

Los principales problemas técnicos que enfrenta el reciclado primario son:

- 1) Degradación del material debido al procesado repetitivo, y como resultado de ello, una pérdida de propiedades tales como apariencia, resistencia química, procesabilidad y características mecánicas;
- 2) Contaminación del plástico reprocesado;
- 3) Manejo de residuos de baja densidad tales como película o espuma.⁽⁵⁾

Los cambios observados de las propiedades físicas de los plásticos, después de procesarlos a temperaturas elevadas se deben a los cambios en la estructura del polímero tales como: 1) reducción del peso molecular promedio, 2) incremento

en el peso molecular promedio debido al entrecruzamiento y 3) formación de insaturaciones o ciclizaciones debido a las reacciones de las cadenas laterales.⁽¹⁾

La degradación térmica o termo-oxidativa y el entrecruzamiento son los factores involucrados más importantes.

Una disminución del peso molecular, en el caso de que la cadena principal se divida, puede ocurrir al azar o en sitios específicos. La ruptura en las terminaciones de las cadenas provoca pequeños cambios en el peso molecular, y tiene un efecto muy ligero en las propiedades físicas.

La formación de componentes volátiles, puede causar reacciones secundarias, así como, problemas en el procesado. La combinación de radicales durante la degradación térmica puede conducir a estructuras ramificadas las cuales pueden eventualmente entrecruzarse.⁽¹⁾

Las reacciones de cadenas laterales y substituyentes pueden conducir a ciclización o insaturación y ambas producen estructuras rígidas. Un ejemplo típico de la degradación térmica involucrada en cadenas laterales es la deshidrohalogenación de PVC. A elevadas temperaturas el cloruro de hidrógeno se puede remover dando lugar a una estructura insaturada.⁽²⁾

Usualmente, durante el procesado el polímero fundido no se puede aislar del oxígeno, dando lugar a una degradación termo-oxidativa. La oxidación térmica puede conducir a un entrecruzamiento o a una ruptura en la cadena.

La degradación de plásticos durante el proceso a elevada temperatura puede manifestarse en diferentes formas tales como:

- cambio en la viscosidad del polímero (incremento debido al entrecruzamiento o decremento debido al rompimiento de la cadena),
- cambios de las propiedades físicas tales como: resistencia al impacto, rigidez,
- cambio de color,
- reducción de la resistencia química.⁽¹⁾

Para llevar a cabo el reciclado primario, el residuo plástico debe molerse, y tratar de obtener partículas del mismo tamaño que las de la resina virgen. La reducción del tamaño en la mayoría de los casos se lleva a cabo con el uso de molinos.⁽²⁾

Dependiendo del tamaño y forma de partícula requerida, el tamaño de las piezas a cortar, del tipo de desecho plástico (película, tubería, hojas, restos de coladas) es el tipo de molino que se puede usar.

Un molino consiste de una tolva, una cámara de corte (rotor con cuchillas) y criba. La molienda se lleva a cabo en la cámara de corte. La posición de las cuchillas es un parámetro importante de diseño.

Algunos residuos plásticos son difíciles de moler, con molinos estándar, debido a sus propiedades físicas (por ejemplo: materiales hulosos o con bajo punto de fusión) o debido a su baja densidad (por ejemplo espumas, películas o fibras) tales materiales deben ser molidos usando técnicas especiales, las más importantes son las siguientes:

- 1) Molienda criogénica, la cual se lleva a bajas temperaturas, logrando alcanzar tamaños de partícula ideales

para una posterior peletización. Emplea un compuesto refrigerante (llamado criogénico) que es un gas licuado que presenta una temperatura de ebullición inferior a -73°C . Dentro de estos líquidos, se puede encontrar el argón, oxígeno, helio, hidrógeno, anhídrido carbónico y nitrógeno.

Debido a factores de seguridad, costo y disponibilidad, el anhídrido carbónico líquido y el nitrógeno líquido son los únicos fluidos apropiados para la molienda criogénica.

2) Los residuos plásticos de baja densidad tales como películas, fibras o espumas, pueden ser reprocesados por molienda seguida de una extrusión usando un tornillo de diseño especial o compactadores como una parte de la alimentación o por peletizado usando el calor de molienda para fundir o aglomerar las partículas.⁽¹⁾

4.2. RECICLADO SECUNDARIO

El reciclado secundario utiliza residuos plásticos que no pueden ser reprocesados directamente usando equipo estándar para el procesado de plástico.

Existen cuatro principales razones por las cuales el reciclado secundario ha tenido un desarrollo lento:

1) Los residuos plásticos tienden a estar muy contaminados con sustancias no plásticas como, por ejemplo, metales, tierra, tintas, papel, etc.;

2) Si se utiliza como alimentación una mezcla de varios plásticos, éstos podrían ser incompatibles, resultando un producto que tenga propiedades mecánicas pobres;

3) No siempre es posible una alimentación con una composición constante;

4) Para que sea económicamente viable, los productos deben producirse en serie.^[1]

Los residuos plásticos de varios orígenes pueden ser considerados como fuente potencial para procesos de reciclado secundario. Desde el punto de vista del procesado, estos residuos pueden clasificarse en cuatro tipos :

1) Residuos Plásticos Post-consumidor (RPPC) recuperados de los Residuos Sólidos Municipales (RSM). Consisten de una mezcla relativamente constante de grupos genéricos de plásticos con un alto contenido de material no plástico.

2) Residuos Plásticos Post-consumidor (RPPC) obtenidos de envases retornables. La gran mayoría son botellas de agua y de bebidas carbonatadas o refrescos, este material consiste de un solo tipo de plástico y generalmente contiene pequeñas cantidades de contaminantes no plásticos.

3) Residuos Plásticos Industriales mezclados. Este material consiste de residuos plásticos generados en industria, la cual no tiene interés o bien no cuenta con el equipo adecuado para hacer un reciclado primario, lo almacenan en diferentes mezclas y con el manejo se va ensuciando.

4) Residuos Plásticos Industriales de un solo tipo de plástico. Generalmete están contaminados con material no plástico y pueden degradarse al hacer un reciclado primario.^[1]

El reciclado secundario ha sido desarrollado principalmente en países donde los productos son relativamente caros. En la actualidad, probablemente Japón sea el país líder en tecnología de reciclado secundario, seguido por los países de Europa occidental.

Las técnicas dirigidas al reciclado secundario se han llevado a cabo sobre el mismo proceso, las principales son:

- 1) Hacer ligeras modificaciones al equipo de proceso de plástico estándar.
- 2) Usar equipo especializado para reprocesar.
- 3) Llevar a cabo una modificación química para residuos plásticos mezclados.
- 4) Combinar los residuos plásticos con material virgen.
- 5) Utilizar residuos plásticos como material de carga en otros plásticos u otros materiales.

De las técnicas antes mencionadas, sólo 2, 4, y 5. han sido posibles comercializarlas.

4.3. RECICLADO TERCARIO: PIROLISIS

La pirólisis se define como una descomposición física y química de materiales orgánicos causada por el calentamiento en una atmósfera deficiente o libre de oxígeno.

El proceso de pirólisis es capaz de producir compuestos químicos simples derivados de mezclas de residuos de materiales, las cuales podrían de otra forma ser incineradas o depositadas en rellenos sanitarios. Los productos de pirólisis pueden ser empleados como substancias químicas comercialmente útiles o como combustibles.⁽¹⁾

El proceso de pirólisis tiene las siguientes ventajas:

- Los RSM pueden ser convertidos en una forma económicamente viable.

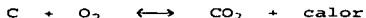
- El volumen de los RSM se reduce en un 90% o más.
- No causa contaminación.
- Debido a que el proceso no contamina y requiere poco espacio, las plantas de pirólisis, pueden ser localizadas en ciudades, resultando un ahorro en los costos de transportación.
- El proceso es productor de energía y se encuentra en forma de gas, aceite y carbón.
- Debido a que durante el proceso toma lugar la oxidación en mínima parte, los componentes metálicos pueden ser recuperados después de que los residuos han sido pirolizados.

La pirólisis, a diferencia de la incineración, es una reacción endotérmica y el calor debe ser aplicado para destilar los componentes volátiles.⁽¹⁾ Las siguientes reacciones se llevan a cabo durante la pirólisis de RSM:

Reacción principal:



Reacciones secundarias:



El producto principal comercialmente útil, obtenido de los RSM es gas combustible, mientras que los productos de pirólisis de RPPC pueden ser usados como combustible o como materia prima para la industria química.

Los polímeros se descomponen en moléculas más pequeñas o monómeros dependiendo de su estructura y las condiciones de la reacción. En la tabla 4.1 se indican algunos polímeros y los monómeros que forman.⁽¹⁾

Durante el proceso de pirólisis toman lugar las siguientes reacciones:

- 1) Despolimerización, en la que se producen monómeros;
- 2) Fragmentación de cadenas, en la que se producen materiales de bajo peso molecular;
- 3) Producción de compuestos insaturados, entrecruzamiento de polímeros y producción de carbón.⁽¹⁾

Los gases producidos son gases combustibles altamente energéticos con un valor calorífico de alrededor 50 MJ/m³.

Cualquier tipo de RPPC puede ser pirolizado incluso si está sucio.

Más de 20 tipos diferentes de RPPC y residuos de hule se han pirolizado en los últimos años.

Poliiolefinas, poliésteres y hule dan cantidades similares de gas y aceite, mientras que PS, PMMA, PVC y lignina producen más aceite que gas. Todos los tipos de carga como carbón negro, óxidos de metal, sílica y metales se concentran en los residuos.

tabla 4.1 Reacciones de despolimerización térmica.⁽¹⁾

Polímero	Reacción	Monómero producido
PMMA	$- \text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{COOCH}_3 \end{array} - \longrightarrow \text{CH} - \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{COOCH}_3 \end{array} - \longrightarrow$	100% (a)
PMS	$- \text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} - \longrightarrow - \text{CH} - \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} - \longrightarrow$	100% (b)
PS	$- \text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{CH} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} - \longrightarrow - \text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{C} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} - \longrightarrow$	40% a 300-400°C INESTABLE
PE	$- \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \longrightarrow - \text{CH}_2 - \text{CH} - \longrightarrow$	Fragmentos a 400°C

(a,b) estable, no reactivo.

Normalmente es difícil la obtención de monómeros por medio de la pirólisis.⁽²⁵⁾ De la pirólisis de poliolefinas se obtienen las siguientes fracciones (% en peso):

Gas	20	-	90
Aceite	5	-	45
Carbón negro y material de carga	0.2	-	10

El gas consiste principalmente de metano, etano, etileno, propileno y buteno. Los productos combinados de etileno y propileno producidos de poliolefinas no exceden el 60 % en peso.

En la tabla 4.2 se presenta un resumen de los RPPC que han sido estudiados

Tabla 4.2 Pirólisis de RPPC en reactor de lecho fluidizado. Diferentes alimentaciones y sus productos. ^[25]

Alimentación	Temperatura °C	Gas (Aceite % en	Residuos peso	Otros)
Poliétileno PE	760	55.8	42.4	1.8	
Polipropileno PP	740	49.6	48.8	1.6	
Poliestireno PS	580	9.9	24.5	0.6	65 estireno
Mezcla PE/PP/PS	750	52.0	46.6	1.4	
Poliéster	768	50.8	40.0	7.1	2.1 H ₂ O
Poliuretano	760	37.9	56.3	0.5	5.0 H ₂ O 0.3 HCN
Poliamida PA-G	760	39.2	56.8	0.6	3.4 HCN
Policarbonato	710	26.5	46.4	24.6	2.5 H ₂ O
Poli(metil meta- acrilato)	450	1.3	1.4	0.15	97.2 MMA
Policloruro de vinilo PVC	740	6.8	28.1	8.8	56.3 HCl
Poli(tetra- fluoroetileno)	760	89.3	10.4	0.3	
Jeringas médicas	720	56.3	36.4	5.8	1.5 acero
Desecho Plástico domiciliario	787	43.6	26.4	25.4	4.6 H ₂ O
Desecho plástico de carros	733	29.9	26.7	27.6	14.0 metal 1.8 H ₂ O
EPDM - hule*	700	32.3	19.2	47.5	1.0 H ₂ O
SB - hule**	740	25.1	31.9	42.8	0.2 H ₂ S
Desecho de llanta	700	22.4	27.1	39.0	11.5 acero
Lignina	500	3.4	29.9	49.3	17.4 H ₂ O
Celulosa (madera)	700	47.1	23.0	18.6	11.3 H ₂ O
lodo agua residual	600	34.3	27.7	33.2	4.8 H ₂ O
EPDM	Monómeros	Dieno	Etilen-Propileno	**	SB Estireno- Butadieno

La pirólisis de RPPC requiere equipo especializado ya que se enfrentan los siguientes problemas:

Debido a que los plásticos tienen una pobre conductividad térmica se requiere un tiempo largo antes de que la descomposición se alcance resultando en una menor capacidad del proceso comparada con las dimensiones del aparato de la pirólisis. (1)

Los residuos de carbón tienen una tendencia a adherirse a las paredes del reactor y es difícil descargar continuamente.

Muchos plásticos al calentarse producen fluidos fundidos con viscosidades altas los cuales son difíciles de transportar.

La tabla 4.3 lista algunos procesos de pirólisis de plásticos. Cada uno de éstos sistemas trata de resolver los problemas antes mencionados. (1,25)

Tabla 4.3 Algunos procesos de pirólisis de plásticos. (1,25)

Nombre proceso	tipo reactor y calentamiento	T reacción ° C	Alimentación	Producto
Union Carbide	Extrusor, Tubo anular calentado eléctricamente	420-600	PE, PP, PS, PVC, PET, PA (mezcla)	Ceras gas
Sanyo Electric Co.	Reactor tubular calentamiento dieléctrico	260 PVC 500-550	PS espuma mezcla de plásticos	estireno aceite HCl
Mitsui Petrochemical Ind.	Reactor de tanque agitado	420-455 ° F	PEBD, PP atáctico	aceite
Mitsubishi Heavy In.	Reactor con reflujo	550	PEBD, PEAD, PP, PS, PVC	gas aceite HCl
Universidad Hamburgo	Reactor de lecho fluidizado	640	PE, PS, PVC, hule	hidrocarburos
DBA (BKMI) Alemania	Horno rotatorio	450-500	desechos plásticos	gas
Ebara Japón	Dos lechos fluidizados		desechos plásticos	gas
Kobe Steel Japón	Horno rotatorio	500-700	desechos plásticos	aceite, gas
Tesco II EUA	Horno rotatorio	500-550	desechos plásticos	gas, carbón
Energas	Horno rotatorio	650-750	desechos plásticos	gas

4.4. RECICLADO CUATERNARIO: INCINERACION

La combustión ha sido definida como un proceso químico, que está acompañado por la evolución de luz y calor en presencia de oxígeno. Los principios de la combustión se aplican comúnmente a un proceso especializado llamado incineración.^[17]

El objetivo de la incineración es quemar los RSM, así como reducir su volumen y producir gases inofensivos y cenizas no combustibles. La reducción de volumen va de 80 a 95%, la reducción en peso tiene un intervalo de 70 a 80% dependiendo de la calidad de combustión y de la cantidad de substancias no combustibles.

Un incinerador generalmente contiene ciertos elementos básicos, incluyendo un sistema de alimentación, cámara(s) de combustión, un sistema de escape de gases, y un sistema de disposición de cenizas. Puede incluir equipos auxiliares como desfibradoras y clasificadores de materiales en la parte inicial, un dispositivo de control de aire contaminado y un sistema de recuperación de calor en la parte final del incinerador.

Los incineradores modernos usan sistemas de alimentación continua y parrillas móviles en una cámara de combustión primaria, la cual está revestida de materiales refractarios (materiales a base de sílica resistentes al calor). Las cámaras de combustión secundarias, se utilizan para quemar los gases y las partículas sólidas que no se quemaron en la cámara de combustión primaria antes de descargar a la atmósfera o al dispositivo de control de contaminación.^[17]

Los incineradores pueden ser de alimentación continua o alimentación discontinua (batch). Los primeros tienen la

ventaja sobre los segundos ya que el proceso puede ser controlado más fácilmente y se pueden mantener temperaturas uniformes en la zona de combustión.

La recuperación de calor se lleva a cabo mediante el uso de tubos que llevan dentro agua, los cuales están soldados entre sí y pegados a las paredes. El agua o vapor circula a lo largo de los tubos y extrae calor en la zona de combustión.

La temperatura de la cámara de combustión, debe estar encima de 750°C para asegurar una adecuada combustión y abajo de 1000°C para prevenir cenizas y atasque de la parrilla o el acortamiento de vida de los materiales refractarios.

Kaiser y Carotti investigaron en 1971 el efecto en la incineración de RPPC mezclados con RSM. Los RSM se incineraron solos y sirvieron como referencia, seguida de la combustión de RSM con 2 y 4% de RPPC agregado.⁽¹⁾

Examinaron cuatro plásticos: polietileno (PE), poliestireno (PS), poliuretano (PU) y policloruro de vinilo (PVC), todas estas pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones normales de operación y obtuvieron los siguientes resultados:

- Se encontró la presencia de cloro en la incineración de los RSM sin contenido de RPPC. Durante la combustión, la mayoría del cloro formó HCl. No se detectó cloro libre o gas fosgeno (COCl_2). Al adicionar PE y PS no tuvieron efectos en la concentración de cloro. La adición de PU causó un ligero incremento y la adición de PVC causó un incremento considerable en la concentración de Cl^- .

- La concentración promedio de NO fue baja en todas las muestras. La adición de plásticos causó un incremento de la concentración de NO hubiera o no nitrógeno en los plásticos.

- No hubo una correlación entre la concentración de SO_2 y de CN^- y la cantidad o tipo de plástico agregado.

- La adición de plásticos causó una ligera variación en la cantidad de ácidos orgánicos producidos.

Las pruebas indicaron que se pueden usar incineradores convencionales para incinerar RSM conteniendo hasta un 6% de RPPC e incluso un poco más.

A continuación se describen las diferentes propiedades de combustión para varios plásticos:⁽¹⁴⁾

Poliolefinas (por ejemplo: polietilenos, polipropilenos, poliestirenos). Todos éstos tienen calores de combustión altos (generalmente arriba de 17,000 Btu/lb. Forman bióxido de carbono y agua en la combustión primaria. Pueden contener aditivos como pigmentos o retardantes a la flama que generalmente producen pequeñas cantidades de ceniza o gases corrosivos o tóxicos.

Plásticos que contienen oxígeno (por ejemplo: policarbonatos, poliacetales, poliéteres, poliésteres, poliacrilatos, y polimetacrilatos). Típicamente estos tienen calores de combustión bajos (11,000-17,000 Btu/lb), también forman en la combustión primaria bióxido de carbono y agua. Aditivos como retardantes a la flama o pigmentos pueden producir cenizas, gases tóxicos o corrosivos.

Plásticos que contienen nitrógeno (por ejemplo: poliacrilonitrilos, poliamidas y poliuretanos). Estos contienen valores de calor de combustión similares a los plásticos que contienen oxígeno.

Plásticos que contienen halógenos (por ejemplo policloruro de vinilo y otros polihaluros de vinilo. Estos plásticos

tienen calores de combustión bajos (menores a 11,000 Btu/lb). Estos polímeros producen cloruro de hidrógeno o fluoruro de hidrógeno, los cuales disueltos en agua producen los correspondientes ácidos que corroen al metal y a otros materiales. Por otra parte, sin suficiente material inflamable y aire (oxígeno) para asegurar la temperatura de flama, estos materiales tiende a producir hollín cuando se queman.

A pesar de su bajo porcentaje en peso en los RSM, los RPPC contribuyen desproporcionadamente al contenido en energía.

Asumiendo calor de combustión promedio para una mezcla de plásticos de 14,000 Btu/lb, los RPPC contribuyen un tanto más por encima de la mitad al valor combustible de los RSM como una masa comparable de papel o madera, y tienen un valor combustible tres veces más que el de los RSM.

Se ha estimado que un contenido de 7.3% en peso de RPPC en los RSM pueden contribuir aproximadamente con un 25% del contenido total de Btu de los RSM. Ver la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Valor calorífico de algunos RPPC y otros componentes de los RSM. (16)

Material	Ejemplos	Valor calorífico (Btu/lb)
Poliiolefinas	Poliétileno Polipropileno Poliisobutileno Poliestireno	17,870-20,150
Plásticos conteniendo halógenos	Policloruro de vinilo Policloruro de vinilideno	7,720 4,315
Plásticos conteniendo oxígeno	Policarbonatos Poliacetales Poliéteres Poliésteres Poliacrilatos Polimetacrilatos	11,470-13,410
RSM		4,500 - 5,500
Plásticos conteniendo nitrógeno	Poliacrilonitrilo	13,860
Papel		7,590
Madera		8,520

Nota: Estos valores energéticos representan la cantidad de energía desprendida durante la combustión de una substancia y puede ser usada para comparar las eficiencias relativas de diferentes substancias como combustibles durante la incineración. Para comparar, el valor calorífico del aceite combustible es aproximadamente de 17,700 Btu/lb.

Los RPPC pueden ser una fuente importante de energía. Los incineradores estándar, son capaces de quemar RSM que contengan plástico, pero no pueden quemar residuos formados solamente por RPPC.

Se tienen los siguientes problemas asociados con la incineración de plásticos:

- Las sales de plomo y cadmio que se usan como estabilizadores de PVC permanecen en las cenizas causando problemas de disposición final.
- El HCl que se produce se absorbe en el agua y el agua acidulada no puede ser dispuesta sin un tratamiento previo.
- Las temperaturas generadas durante la combustión de RPPC son mucho más altas que las generadas durante la combustión de RSM. Las altas temperaturas podrían causar daños a los incineradores.
- La mayoría de los incineradores convencionales no son capaces de suministrar una cantidad adecuada de aire para completar la combustión de los plásticos. Una combustión incompleta, produce hollín que daña a los tubos de la unidad de intercambio de calor afectando su rendimiento.
- Los productos de la combustión tales como HCl, NH₃, SO₂, SO₃, NO_x, y RCOOH son corrosivos y causan daños a los componentes del incinerador. Si los componentes contienen agua, ésta acelera la acción corrosiva de los gases.

Los PVC's pueden provocar la formación de dioxinas, por ejemplo dibenzodioxina policlorinada PCDD y furanos, como el dibenzofurano PCDF, al ser donadores de cloro.

Algunas investigaciones tratan de demostrar que los RPPC contenidos en los RSM, especialmente el PVC, tienen un pequeño efecto en la formación de dioxinas.

Un incinerador debe ser diseñado para una buena combustión y prevenir la formación deliberada de hollín. Las paredes y la base del horno deben ser capaces de resistir las altas temperaturas generadas por la combustión de plásticos.

El equipo de suministro de oxígeno debe proveer 2.5 a 3 veces la cantidad de aire requerida teóricamente para la combustión de plásticos. El incinerador debe ser diseñado de tal forma que mantenga la temperatura abajo de 1150°C. Ya que el volumen de humo es proporcional al volumen de aire usado, el diámetro de la chimenea debe agrandarse.

Algunos ejemplos de incineradores apropiados para RPPC pueden ser usados para recuperar su energía o solamente para su disposición final.

Pueden utilizarse incineradores de tipo multiestado, el cual utiliza varias cámaras de combustión, también incineradores de circulación de aire con presión, donde éste se suministra con turbulencia.

La figura 4.1 muestra esquemáticamente un incinerador especial para PVC. El HCl que se produce en el horno, por calentamiento se vaporiza, y se pasa a través de un ciclón seguido por un enfriador de gas y entonces reacciona con gas amonio para producir cloruro de amonio el cual se recolecta en un colector de polvo.⁽¹⁾

Equipo de la planta de eliminación de desechos plásticos de la fig. 4.1.1⁽¹⁾

- 1) Ventilador
- 2) Depósito
- 3) Grúa de alimentación
- 4) Cuarto de operación de la grúa
- 5) Tolva
- 6) Alimentador vibratorio
- 7) Colector de metal
- 8) Cinta transportadora para metal colectado
- 9) Trituradora
- 10) Alimentador de catidad fija
- 11) Alimentador sellado de gas
- 12) Unidad de pretratamiento
- 13) Propagador
- 14) Incinerador
- 15) Caldera
- 16) Calentador de gas circulante
- 17) Colector de polvo
- 18) Ventilador de inducción de aire
- 19) Chimenea de humo
- 20) Cinta transportadora para ceniza
- 21) Ventilador de empuje
- 22) Cama distribuidora de ceniza
- 23) Quemador auxiliar
- 24) Ventilador de gas circulante
- 25) Enfriador de gas
- 26) Reactor
- 27) Separador de cloruro de amonio
- 28) Filtro de gas
- 29) Tanque de almacenamiento de amonio
- 30) Carburador de amonio
- 31) Transportador de cloruro de amonio
- 32) Tanque de almacenamiento de cloruro de amonio
- 33) Tolva alimentadora
- 34) Bolsa contenedora
- 35) Báscula
- 36) Grúa de descarga
- 37) Multiciclón
- 38) Ventilador de gas excedente.

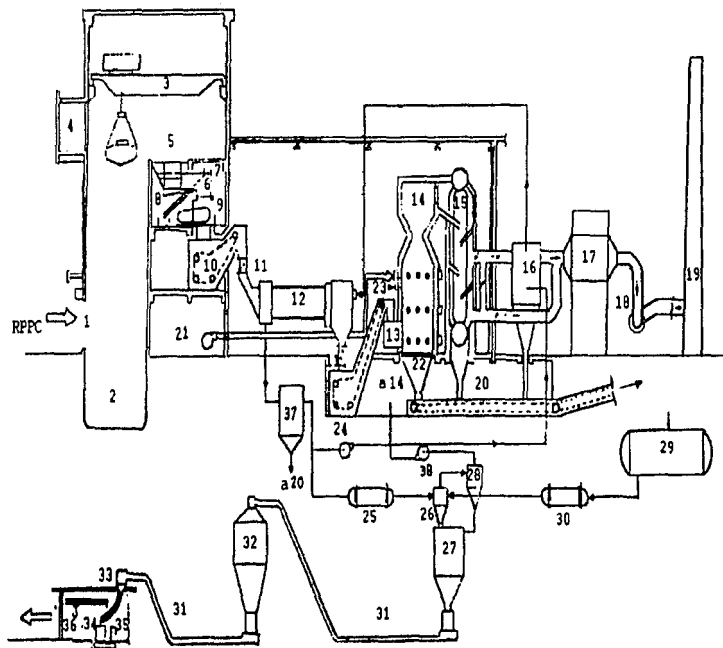


Fig. 4.1 Planta de eliminación de desechos plásticos.

Debido a que este trabajo está enfocado al reciclado secundario de los RPPC de gran volumen contenidos en los RSM, de acuerdo con la investigación llevada a cabo, se encontró que PEAD, PEBD, PVC, PP y PS son los plásticos de gran volumen, por lo que en el siguiente capítulo se hablará brevemente de ellos y el capítulo 6 estará enfocado a las técnicas utilizadas en el reciclado secundario de estos plásticos.

5. PLASTICOS DE GRAN VOLUMEN

En este capítulo se revisarán brevemente las características y propiedades de los cuatro plásticos de mayor volumen que forman parte de los RPPC contenidos en los RSM, ellos son: PE (PEBD, PEAD), PVC, PS y PP, que pertenecen al grupo de los termoplásticos.

En la industria de los plásticos, el comportamiento a alta temperatura constituye un factor importante en el uso económico y en la estabilidad del uso final del producto. El término *termoplástico* se aplica a aquellos materiales que se ablandan y fluyen por la aplicación del calor y presión.

Así, la mayoría de los materiales termoplásticos pueden procesarse muchas veces, aunque la degradación química llegará a limitar el número de los ciclos de proceso. La ventaja obvia consiste en que una pieza que se rechazó o se rompió después de moldearse, se puede volver a procesar. La desventaja es que hay una temperatura límite para el material arriba de la cual estos materiales no pueden usarse para elementos estructurales.^(2*)

5.1. POLIETILENO

Los polietilenos son resinas termoplásticas producidas por proceso de alta y baja presión usando varios sistemas catalíticos sofisticados. El resultado es una familia de polímeros (de baja densidad, lineal baja densidad, de alta densidad) cada uno de ellos tiene diferentes comportamientos y características de funcionalidad.

Generalmente todos los polietilenos poseen propiedades eléctricas excelentes, gran resistencia al agua y a la humedad, y buena resistencia a disolventes orgánicos y productos químicos. Son materiales traslúcidos, de peso ligero, resistentes y flexibles.

Por ser los plásticos de mayor uso, se presenta un breve estudio de ellos.

Breve historia: (29)

Los experimentos que llevaron al descubrimiento del polietileno fueron realizados por Alkali Div. de ICI (Imperial Chemical Industries) en 1932. Originalmente se llevaron a cabo reacciones con etileno y benzaldehído a 170°C y 20,000 psi, resultando un sólido ceroso blanco, depositado en las paredes del recipiente, que fue identificado como un polímero de etileno.

En 1936 se encontró que el polímero tenía alta resistividad eléctrica, y era capaz de convertirse en película delgada transparente y también podía utilizarse como aislante de cables. En 1937, se diseñó una planta piloto a escala pequeña y en 1939 ICI construyó una planta comercial. Los usos del polietileno se aceleraron por las necesidades de la Segunda Guerra Mundial.

En la década de los 50's se descubrieron ciertos sistemas catalíticos que permitieron la polimerización del etileno a baja presión. En 1951 Standar Oil de Indiana patentó un proceso usando un catalizador soportado por óxido de molibdeno. En 1953 Phillips Petroleum polimerizó etileno con un catalizador soportado por trióxido de cromo, resultando homopolímeros de cadenas lineales (alta densidad o PEAD) con una densidad muy alta.

En 1953 Karl Ziegler en el Instituto de Max Planck en Alemania encontró que ciertos compuestos de metales de transición, podían dar rendimientos altos de polietileno con peso molecular en la región de 300,000 y a bajas presiones, aproximadamente igual a las condiciones atmosféricas. Con este proceso se produjo PEAD con una densidad de 58.6 lb/ft^3 (0.940 g/cm^3), siendo más rígido que el PEBD de alta presión del proceso ICI.

En 1954 el profesor G. Natta del Instituto de Química Italiano anunció el descubrimiento de polímeros estereorregulados derivados de alfa olefinas tales como propileno.

En la década de los 60's Union Carbide desarrolló un proceso de polimerización a baja presión capaz de producir polietileno en fase gaseosa y que no requería de disolventes. Este proceso empleó un catalizador basado en cromo. Una planta comercial entró en operación en los principios de los 70's.

A finales de los 70's diversas investigaciones permitieron producir resinas de baja densidad a bajas presiones y bajas temperaturas.

Las plantas de procesos de baja presión (alta densidad) han estado operando aproximadamente por 20 años y han sido capaces de producir copolímeros de polietileno que tienen densidades tan bajas como 58.3 lb/ft^3 (0.935 g/cm^3).

En 1977 Union Carbide, anunció una nueva tecnología basada en el proceso de fase gaseosa del polietileno de alta densidad que permitió la producción económica de polietileno baja densidad en condiciones de baja presión (menores que 100 psi). La planta productora requirió una

demanda energética menor y costos de operación más bajos que las plantas convencionales de alta presión.

Durante ese mismo periodo la compañía Dow Chemical comenzó a producir polietileno mediante un proceso en solución basado en catalizadores tipo Ziegler/Natta. Las resinas se produjeron a presiones bajas y tuvieron bajas densidades en un sistema derivado de la tecnología de resinas de alta densidad. Los copolímeros resultantes basados en comonomero 1-octeno de alto peso molecular fueron introducidos y vendidos como polietileno lineal de baja densidad (LLDPE).

Du Pont de Canadá ha estado produciendo LLDPE por 20 años bajo el nombre de resinas Sclair. El proceso de solución utilizado por Du Pont utilizó 1-buteno como un comonomero incorporado.

El LLDPE consiste de moléculas lineales que tienen cadenas laterales cortas ramificadas, y su longitud está determinada por el comonomero empleado durante la polimerización. Las cadenas pueden variar de un grupo de un átomo de carbono (con propileno como comonomero) a un grupo de seis carbonos (con 1-octeno como comonomero incorporado).

En 1954 el profesor Ziegler inventó un polietileno lineal de alta densidad con peso molecular ultra alto con un rango de 3 a 6 millones conocido por UHMWPE, el cual es un termoplástico con propiedades químicas similares a las del PEAD. Sin embargo, su peso molecular extremadamente alto lo provee de una resistencia excepcional al impacto y a la abrasión.

La figura 5.1 ilustra la diferencia en las moléculas de PEAD, LLDPE, y PEAD.

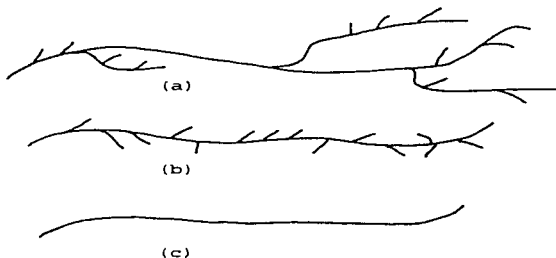


Fig. 5.1 Diferencia en las moléculas de (a) PEBD, (b) LLDPE y (c) PEAD.^[29]

En México se producen solamente PEAD y PEBD y son los polietilenos que se encuentran en mayor proporción en los RSM, los LLDPE y UHMWPE no se producen en México, se importan en pequeñas cantidades, consecuentemente llegan a formar mínimas partes en los RSM, por lo que nos enfocaremos a una breve descripción de propiedades, proceso de fabricación en México y aspectos comerciales de PEAD y PEBD.

A) POLIETILENO (BAJA DENSIDAD) ^[30]

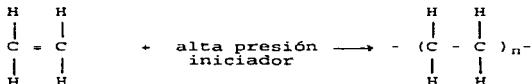
- Nombre químico: Polietileno de baja densidad (PEBD)
- Número de Chemical Abstracts: 9002-88-4 (para todos los polietilenos)
- Nombre común: Inglés: Polyethylene (low-density), LDPE
- Fórmula condensada: $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2)_x$

- Propiedades: Sólido blanco de consistencia característica; densidad 0.915-0.925; insoluble en agua y en disolventes orgánicos (lo atacan los disolventes orgánicos a temperatura mayor de 93°C); intervalo de temperatura de fusión 106-112° C; alta resistencia eléctrica y a la corrosión; resistencia a la tensión 1,500 lb/in².

- Toxicidad: no es tóxico, pero es combustible.

- Empresas fabricantes en México: Petróleos Mexicanos (PEMEX)

- Polimerización: El PEBD se produce por polimerización de etileno a alta presión para formar moléculas de polietileno. (29, 30)



gas etileno + alta presión \longrightarrow POLIETILENO
peróxido de laurilo

Resulta un polímero termoplástico de larga cadena altamente ramificada con una densidad de 0.915-0.925 g/cm³ y un peso molecular por encima de 4x10⁶.

El PEBD se produce por la polimerización de radicales libres de etileno a alta temperatura y alta presión. La temperatura varía de 150-300°C y la presión tiene un intervalo de 15,000-50,000 psi.

Los procesos comerciales para producirlo pueden usar reactores tubulares o autoclaves agitados. El calor de reacción es absorbido por una corriente fría de etileno.

- Método de fabricación en México: Se obtiene por la polimerización del etileno con peróxido de laurilo como iniciador a presiones altas.

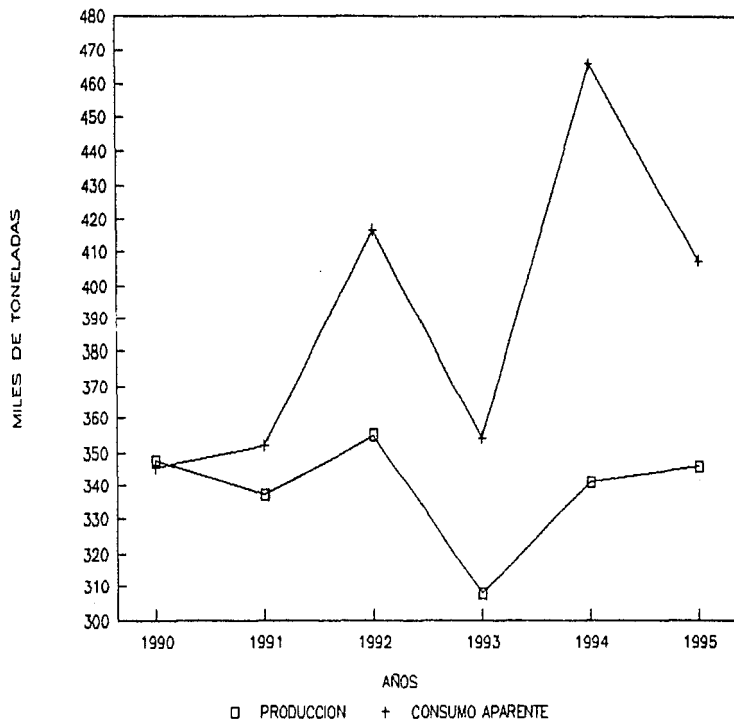
Este PEBD puede ser procesado mediante técnicas como extrusión para obtener películas, láminas, tubos, recubrimientos de papel, etc.; moldeo por inyección; moldeo por soplado; moldeo por compresión y calandreado.

- Distribución: Para 1994 la película transparente tenía 76%; la película industrial 8%; artículos para el hogar 6%; recubrimiento interior de envases 6%; tubería y otros 6%.

- Capacidad instalada en México: Actualmente PEMEX tiene plantas en operación en Poza Rica, Ver., en Reynosa Tam. y en la Cangrejera, Ver. En total tiene en operación 309,000t/año de capacidad nominal, sin embargo se han logrado producciones superiores a 330,000 t/año en los últimos años.

- Situación del mercado en México: El PEBD producido en su totalidad por Petróleos Mexicanos (PEMEX), es el plástico de mayor participación en el mercado de las resinas termoplásticas sintéticas. Se inició la producción en 1966 con una planta pequeña y en 1971 se incrementó con otra planta de 51,000 t/año; en el periodo de 1970-1975 la producción creció a una tasa media anual de 31%, hasta alcanzar 99,000 t, a partir de entonces se ha mantenido un crecimiento menor. No obstante que la capacidad de producción se ha incrementado sustancialmente, se continúa con importaciones, probablemente de polietilenos que no se fabrican en el país como los lineales de baja densidad.

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD [11]



B) POLIETILENO (ALTA DENSIDAD) ⁽¹⁰⁾

- Nombre químico: Polietileno de alta densidad (PEAD)
- Número de Chemical Abstracts: 9002-88-4 (para todos los polietilenos)
- Nombre común: Inglés: polythylene (high-density), HDPE
- Fórmula condensada: $(-CH_2-CH_2-)_x$
- Propiedades: Sólido blanco, similar al PEBD. Material termoplástico. La densidad es 0.960-0.965 g/cm³; insoluble en agua; alta resistencia eléctrica; tiene una resistencia a la tensión de 4,000 lb/in²; la película es permeable a los gases, no es resistente al ácido nítrico.
- Toxicidad: No es tóxico, pero es combustible.
- Empresas fabricantes en México: Petróleos Mexicanos (PEMEX).
- Polimerización: El PEAD se produce a baja presión, en muchos casos, por debajo de 1000 psi. La preparación y activación del catalizador es muy importante ya que determina las propiedades del polímero. Los catalizadores usados son generalmente óxidos de metales de transición ó catalizadores tipo Ziegler/Natta. ^(12), 10)

Estos catalizadores de Ziegler/Natta son complejos de halogenuros de metales de transición con compuestos organometálicos, es muy típico el trietilaluminio-tricloruro de titanio. ⁽¹²⁶⁾

- Método de fabricación en México: El proceso de polimerización del etileno se lleva a cabo con un

catalizador a base de aluminio y titanio a presión atmosférica, no se requiere usar etileno de alta pureza, pero si eliminar las principales impurezas.

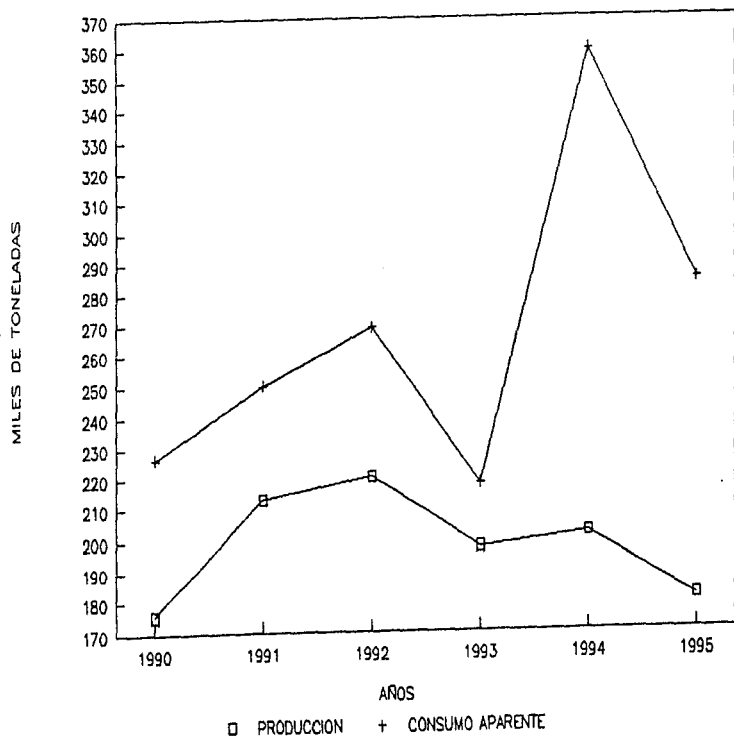
El polietileno puede ser procesado mediante extrusión, moldeo por soplado, formado al vacío.

- Distribución: Los usos en 1994 fueron: artículos para el hogar 37%; envases grandes 19%; cajas 12%; envases medianos y para alimentos 10%; juguetes y diversión 8%; industria, incluso farmacéutica 11%; otros 3%.

- Capacidad instalada en México: PEMEX tiene en operación una planta con capacidad de 100,000 t/año que entró en operación en 1978 y está localizada en Poza Rica, Ver., en Morelos, Ver., se tiene otra planta con capacidad de 100,000 t/año, en dos trenes de 50,000 c/u que entraron en operación en 1989 y 1990, respectivamente. Entonces la capacidad actual es de 200,000 t/año.

- Situación del mercado en México: Se inició la producción a finales de 1978 y desde entonces ha crecido tanto la producción como las importaciones. Estas probablemente sean de variedades de polietileno que no se fabrican en el país, como el polietileno lineal de baja densidad.

POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD [11]



5.2. POLICLORURO DE VINILO ⁽¹²⁰⁾

- Nombre químico: Polímero de cloruro de vinilo (PVC)

- Número de Chemical Abstracts: 9002-86-2

- Nombre común: Cloruro de polivinilo.

Inglés: Polyvinyl chloride, PVC

- Fórmula condensada: $(-\text{CH}_2\text{CHCl}-)_x$

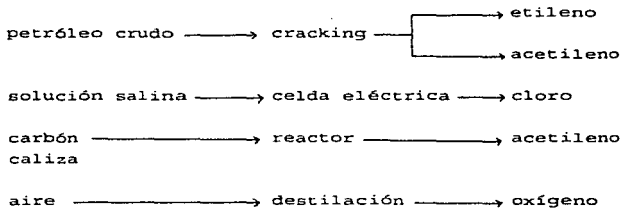
- Propiedades: Las propiedades del PVC están determinadas por el tipo y la cantidad de aditivos. El PVC es un plástico formulado. Su densidad puede variar de 1.18 g/cm^3 para un compuesto claro a 1.70 g/cm^3 para un compuesto con carga. La adición de plastificante cambia las propiedades mecánicas del PVC. Soluble en hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos clorados y cetonas. Resistente a aceites minerales, alcoholes, ácidos y álcalis diluidos. Se degrada entre $300-400^\circ\text{C}$. Es fácil de colorear y procesar, una vez plastificado y modificado. La temperatura de proceso es de $160-220^\circ\text{C}$.

Toxicidad: No es tóxico

- Empresas fabricantes en México: Altaresin, Grupo Primex, Policyd, Polímeros Corporativo Empresarial, Especialidades Industriales y Químicas. ⁽¹²⁷⁾

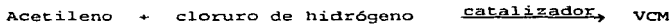
- Polimerización: Para producir el monómero de cloruro de vinilo se necesitan acetileno, etileno, cloro y oxígeno, los que se obtienen a partir de:

gas natural \longrightarrow gas planta \longrightarrow etileno

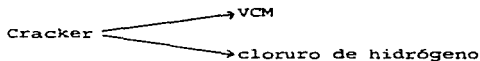
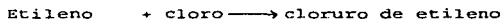


Los procesos por los cuales esta materia prima se convierte en monómero de cloruro de vinilo (VCM) son los siguientes :

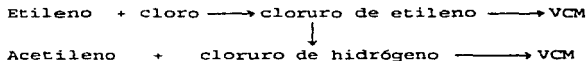
Proceso acetileno:



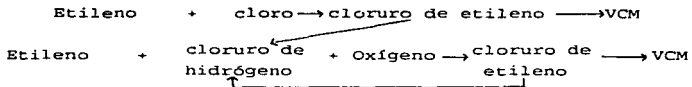
Proceso etileno:



Proceso Balanceado:



En un principio para producir VCM dominaba el método del acetileno, ahora se prefiere el método de oxiclорación:



La mayor proporción de VCM se emplea para elaborar PVC una mínima parte se utiliza para copolimerizar con acetato de vinilo (VAM).

La resina de PVC se produce por cuatro métodos: suspensión, emulsión, masa y solución.

Método de Fabricación en México: Polimerización del cloruro de vinilo por emulsión, suspensión y masa.

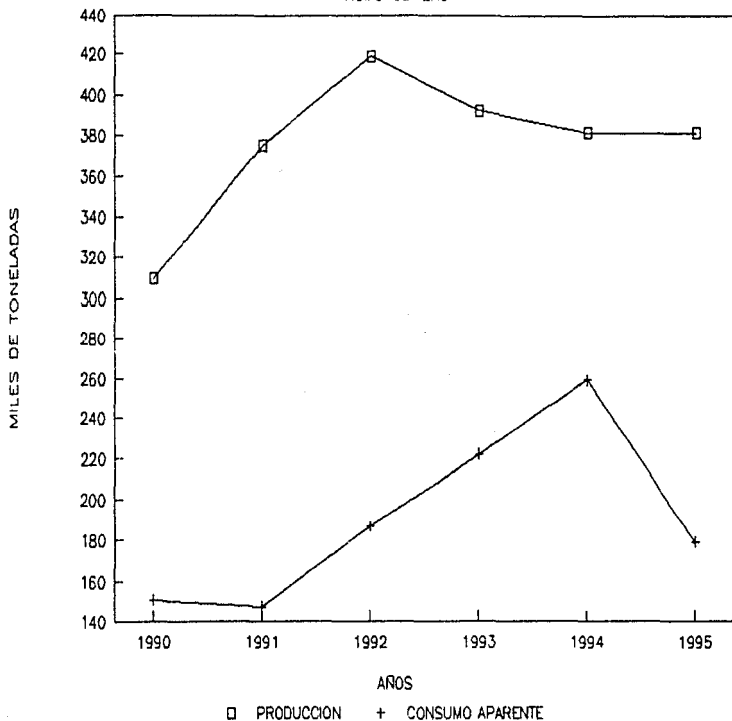
Puede ser procesado mediante las siguientes técnicas: inyección, extrusión, termoformado, moldeo por soplado, moldeo por compresión.

Distribución: Los usos principales en 1994 fueron: tubería 42%, película 12%, cable y alambre 10%, envases 9%, laminados 7%, compuestos 6%, calzado 5%, pisos y loseta 4%, plastisoles 1%, otros 4%.

Capacidad instalada: En 1981 aumentó la capacidad de 136,000 a 208,000 t/año; en 1984 volvió a incrementarse a poco más de 300,000 t/año, y a partir de 1992 a 400,000 t/año.

POLI(CLORURO DE VINILO) [11]

HOMOPOLIMERO



5.3. POLIESTIRENO

Nombre químico: Poliestireno (PS)

Número de Chemical Abstracts: 9003-53-6

Nombre común: Resinas de poliestireno. Inglés: polystyrene, PS

Fórmula condensada: $(C_6H_5CHCH_2)_n$

Se tienen varios tipos y grados de plásticos de poliestireno que son los siguientes:

Poliestireno uso general (cristal): Plástico estirénico no reforzado;

Poliestireno Impacto: Estireno modificado con hule;

Poliestireno Expansible. Estireno con pentano como agente de expansión;

Resina SAN: Copolímero estireno- acrilonitrilo;

Resina ABS: Terpolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno.

Propiedades: (Del poliestireno no modificado). Sólido transparente, duro resistente al impacto; buen aislante térmico y eléctrico. Lo atacan los disolventes de hidrocarburos, pero resiste ácidos, álcalis y alcoholes. Es combustible y su temperatura de autoignición es de 427°C. Se presenta en hojas, placas y esferas.

Toxicidad. Cuando se presenta como poliestireno expansible, muy usual en empaques y aislantes, es fácil de incendiarse. En sus usos normales no es tóxico.

Empresas fabricantes en México: Industrial Ebro-Químex, Industrias Resistol, Poliestireno y Derivados, Policoles, Aislantes y Acústicos de Monterrey, Nacional de Resinas, Poliespuma de México, Productos de Estireno, Polimar, Productos Newton, Productos Sesi.

Polimerización: El monómero de estireno se prepara por reacción de benceno con etileno para producir etilbenceno, seguida de una deshidrogenación catalítica en presencia de vapor para producir estireno.

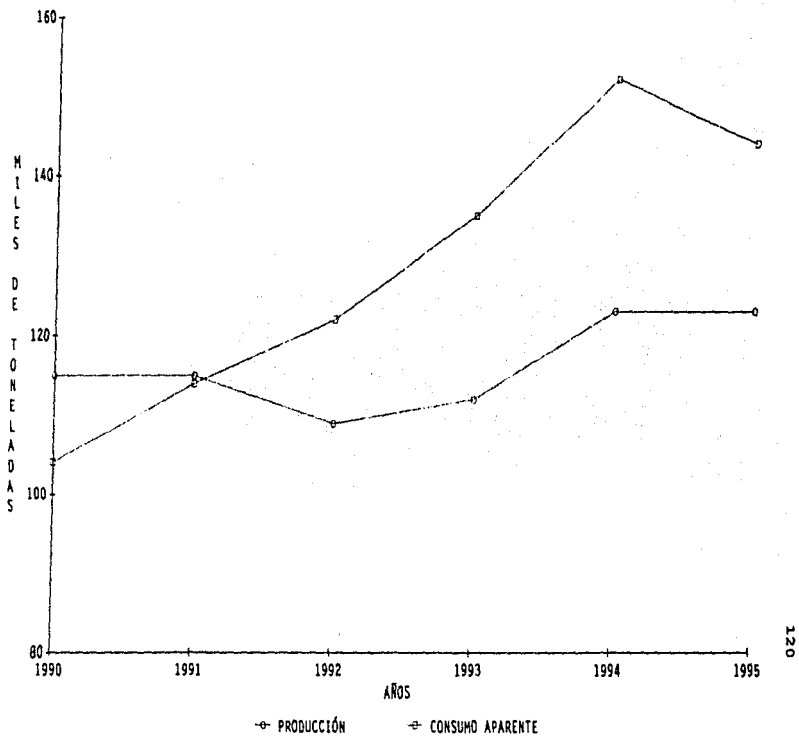
La polimerización del estireno se lleva a cabo por medio de radicales libres con peróxidos, en masa continua.

Distribución. La distribución aproximada en 1994 fue: Envases desechables 21%, electrodomésticos (refrigeradores principalmente) 18%, industria automotriz 16%, industria de la construcción 11%, autoconsumo 8%, empaque 6%, hogar y oficina 3%, electrónicos 2%, muebles 2%, moldeados 4%, anuncios luminosos 3%, otros 5%.

Capacidad instalada en México: La capacidad actual en México es del orden de 200,000 t/año.

Situación del mercado en México: Se trata de una resina ya muy conocida y usada en México desde hace muchos años. El mercado está bastante competido y muy diversificado en cuanto a usos.

POLIMEROS DE ESTIRENO [11]



5.4. POLIPROPILENO

Nombre químico: Polipropileno (PP)

Número de Chemical Abstracts: 9003-07-0

Nombre común: Resinas de polipropileno. Inglés: Polypropylene, PP

Fórmula condensada: $(C_3H_5)_n$

Propiedades: Sólido cristalino; densidad 0.90; temperatura de fusión 168-171 C; resistencia a la tensión 352 kg/cm²; resistencia a la flexión 493 kg/cm²; insoluble en disolventes orgánicos fríos, se ablanda con disolventes calientes; se degrada por el calor y la luz, a menos que contenga antioxidantes; el cloro y el ácido nítrico fumante lo atacan.

Toxicidad: No es tóxico.

Empresas fabricantes en México: Petróleos Mexicanos (PEMEX) e Industrias Derivadas del Propileno (INDELPRO).

Polimerización: El propileno puede polimerizar con tres arreglos geométricos diferentes: isotáctico con todos los grupos metilo hacia un lado de la cadena extendida, sindiotáctico, con los grupos metilo alternando de un lado al otro y atáctico con los metilos distribuidos sin orden. Se ha logrado obtener cada uno de estos tres polímeros isómeros eligiendo las condiciones experimentales apropiadas en cuanto al catalizador, la temperatura y el disolvente.

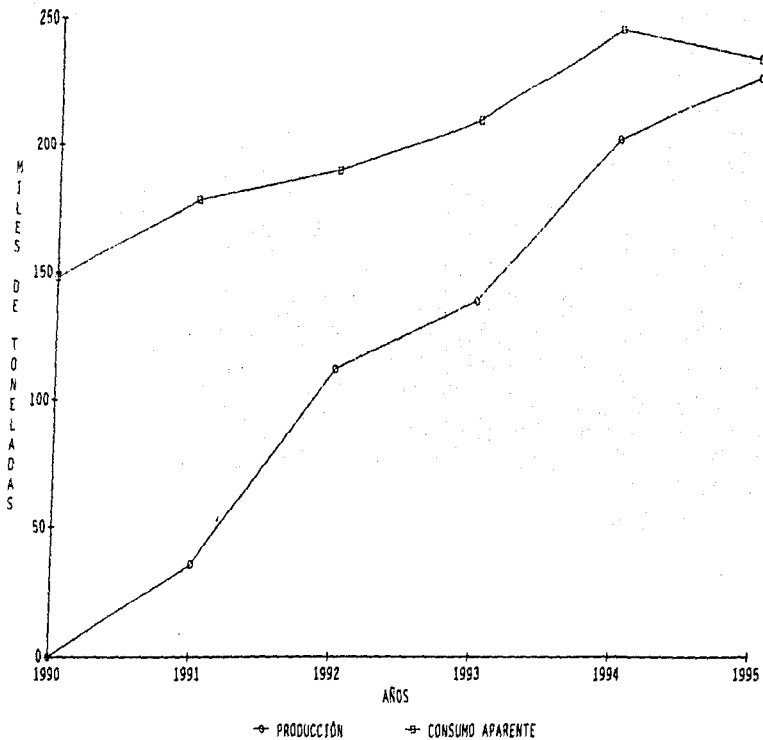
El propileno se alimenta a un reactor que contiene un hidrocarburo líquido como disolvente, generalmente hexano o heptano y un catalizador en suspensión. Las condiciones de

reacción son 50-80 C y 5-20 atm. El polímero producido bajo estas condiciones es insoluble y forma un sólido granular.

Distribución: Se estima que la distribución aproximada del consumo es: plásticos moldeados por inyección 40%; textiles 10%; películas y recubrimientos 20%; tubos, botellas, pasto artificial y otros 30%.

Capacidad instalada: A partir de septiembre de 1991, PEMEX inicia la comercialización de polipropileno producido en su nueva planta de Morelos, Ver., con una capacidad de 100,000 t/año. La empresa INDELPRO es una coinversión del grupo industrial Alfa y Himont, Inc. Los nombres de los productos comerciales son Valtec y Profax. La empresa cuenta con permiso petroquímico para producir 150,000 t/año. El proyecto de INDELPRO arrancó en marzo de 1992 con su planta ubicada en Altamira, Tamaulipas.

POLIPROPILENO [11]



6. TECNOLOGIA DEL RECICLADO SECUNDARIO DE RPPC

El reciclaje es una opción que permite extender de manera importante el espacio y la vida útil de los rellenos sanitarios; ahorrar energía y recursos naturales; aportar nuevamente productos útiles para el consumidor y generar otros beneficios económicos.

RECICLAR significa separar o extraer materiales del flujo de desechos; acondicionarlos para su comercialización; usarlos como materia prima en sustitución de materiales vírgenes para manufacturar nuevos productos y utilizar dichos productos hasta que vuelvan al flujo de los desechos y puedan nuevamente ser reciclados.

El reciclaje contribuye también a reducir al mínimo el impacto ambiental de la disposición de los residuos sólidos mixtos (olores, emisiones a la atmósfera y producción de lixiviados); a preservar recursos minerales, petroleros y forestales y a conservar agua y energía.

6.1. SISTEMA DE CODIFICACION ^(15, 16)

En 1988 el Instituto de botellas plásticas de la Sociedad de la Industria de los Plásticos (Society of the Plastics Industry, Inc., SPI), propuso crear un sistema de codificación para simplificar la identificación de los materiales con los que se fabrican envases rígidos de plástico. El propósito de la codificación es auxiliar a empresas recicladoras en la selección de los plásticos, de acuerdo con el tipo de resina con que están fabricados.

El sistema fue diseñado para ser usado voluntariamente por los productores de botellas y envases rígidos, de modo que el código quede aplicado durante el moldeo o impreso por algún otro método, en la base del contenedor de plástico.

El sistema de codificación ha sido adoptado por una gran cantidad de industrias, no sólo en los E. U. sino en el mundo entero, pues provee una marca de identificación consistente, que resuelve las necesidades de la industria recicladora, tal como fueron planteadas por las mismas empresas seleccionadoras y recicladoras.

El sistema fue diseñado para dar también facilidades a las personas que seleccionan los envases desechados, evitando complejidades que hubieran requerido una capacitación extensiva de los trabajadores y que hubieran podido conducir a confusiones o equivocaciones.

Dadas las condiciones actuales de los mercados de los materiales reciclables, es extremadamente importante que el sistema de codificación sea estandarizado por todos los países. El uso de sistemas de codificación distintos por diversas industrias o países podría afectar significativamente el flujo del comercio internacional.

El sistema permite que el código sea detectado y leído fácilmente. La base del código es un símbolo de forma triangular, integrado por 3 flechas, con un número específico en el centro para representar el material a partir del cual está hecha la botella. Los equivalentes numéricos de las resinas son los siguientes:








PET

Polietilentereftalato



PEAD

Polietileno de Alta densidad (en inglés HDPE)

	PVC	Policloruro de Vinilo
	PEBD	Polietileno de Baja densidad (en inglés LDPE)
	PP	Polipropileno
	PS	Poliestireno
	Otros	Incluye las demás resinas y los materiales multicapa

Los RPPC pueden estar clasificados en dos categorías las cuales son:

- 1) separados y 2) mezclados.

Los RPPC mezclados contienen varias especies diferentes juntas. Los RPPC separados son más valiosos para reciclar debido a que sus propiedades no se abaten como resultado de la mezcla con otros.

El principal problema es la dificultad para conseguir RPPC separados derivados de los consumidores y realmente hay muy pocos ejemplos de donde se pueden obtener, donde los consumidores participen.

La separación manual es una labor intensiva y cara y los medios automáticos no son fácilmente disponibles. En un principio, la separación podría llevarse a cabo por medio de un dispositivo que pudiera detectar alguna propiedad del plástico, podría ser un código de barras, un indicador espectrográfico o una señal de resonancia magnética nuclear (RMN), tal separación automática resulta muy cara, (Ver cap. 3.3), ó bien, se puede llevar a cabo una separación manual haciendo uso del sistema de codificación antes mencionado.

6.2. RPFC SEPARADOS

1) Polietileno (11)

Al reciclar polietileno se modifican propiedades como: resistencia a la tensión, elongación, índice de fluidez, color, debido a que el material se degrada químicamente, es decir que sufre cambios en su estructura molecular, puede ser una ruptura al azar en las cadenas o un entrecruzamiento. De acuerdo al tipo de cambio que se genere en la cadena es la variación de las propiedades.

Cuando el plástico es regranulado más de una vez es necesario adicionarle aditivos especiales para conservar sus propiedades. Se ha encontrado que ciertos estabilizadores de fosfito son efectivos para mantener la estabilidad de plásticos post-consumo, y tienden a mantener el índice de fluidez constante durante las primeras cinco extrusiones.

Se reportan experimentos en los que se utilizó un reómetro de torque en el laboratorio como un método para seguir la degradación acelerada de los materiales. Esta prueba simula los múltiples pasos del proceso.

Los cambios que ocurren en el PEAD durante el procesado son complejos y pueden involucrar entrecruzamiento y ruptura en la cadena.

La compañía GE Plastics de Estados Unidos ofrece un estabilizador que consiste en una mezcla de fosfito (ultranox 626) y un compuesto fenólico bloqueado (ultranox 276).

En la tabla 6.1(11) se indican los efectos de P1 (bis(2,4-di-t-butilfenil) pentaeritritol difosfito) y P3 (tris(2,4-di-t-butilfenil) fosfito) combinados con AO1

(tetrakis (metilen(3,5-di-t-butil-4-hidroxihipocinamato))) metano, sobre el índice de fluidez y el color de una resina virgen de PEAD.

Tabla 6.1 Estabilización de PEAD por el uso de fosfitos

El PEAD se expuso a múltiples pasos de extrusión a 250 °C

	Extrusión No.:			Extrusión No.:	
	1 ^a	3 ^a	5 ^a	1 ^a	5 ^a
	índice de fluidez			índice de amarillamiento	
Base	0.71	0.48	0.49	1.81	9.04
Base + 500 ppm P1	0.82	0.81	0.80	-3.04	-0.46
Base + 1000 ppm P3	0.85	0.85	0.86	-0.18	11.53

Base = PEAD + 500 ppm AO1 (tetrakis (metilen(3,5 - di-t-butil-4-hidroxihipocinamato))) metano).

Durante la prueba el PEAD fue expuesto a múltiples pasos a través de un extrusor. Esta prueba simula el esfuerzo que recibe un material durante el reciclado.

Usar P1 asegura consistencia del índice de fluidez a través de 5 pasos en un extrusor. El PEAD post-consumo responde favorablemente a la adición de estabilizadores. La figura 6.1 indica la consistencia del índice de fluidez, logrado por estabilizadores y lo compara con el de PEAD que no fue estabilizado.

2) Polipropileno (PP) ^[11]

El PP se degrada por un mecanismo térmico oxidativo de radicales libres que originan una ruptura al azar de la

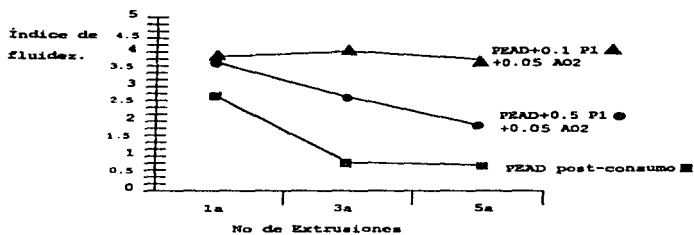


Fig. 6.1 Consistencia del índice de fluidez de PEAD post-consumo.

cadena. La disminución del peso molecular es evidente por el incremento en el índice de fluidez y la disminución de propiedades físicas. Sin suficiente estabilizador, el PP no puede ser procesado sucesivamente como una resina virgen.

Con una estabilización apropiada puede ser reprocesado o reciclado varias veces manteniendo consistentes el índice de fluidez y las propiedades.

El PP responde muy bien a los estabilizadores. Los fosfitos y los antioxidantes fenólicos son efectivos para mantener el índice de fluidez. Después de varios pasos a través de un extrusor, el PP sin estabilizar exhibe un agudo incremento en el índice de fluidez indicando que ha ocurrido ruptura de las cadenas.

La figura 6.2 indica que el PP reciclado de cajas de batería expuesto al calor y al corte en un reómetro de torque, experimenta una menor disminución del torque cuando es estabilizado.

También hay consistencia en el índice de fluidez después de 5 pasos en un extrusor, como se indica en la figura 6.3, cuando se usan los estabilizadores P1 y AO2 (octadecil 3,5-di-t-butil-4-hidroxihipocinamato) en 0.1 %.

3) Policloruro de vinilo (PVC)

El PVC es un material difícil de reciclar, ya que presenta grandes cambios como pérdida de brillo y amarillamiento. Como el cloro es un componente fácil de desprender, el PVC se degrada más rápido que otros materiales.

El PVC utiliza en su formulación una gran variedad de aditivos, sin embargo aún se están desarrollando

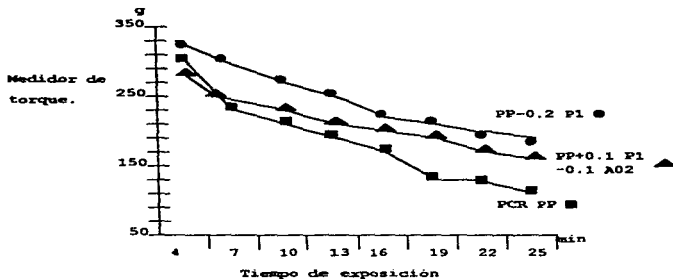


Fig. 6.2 PP reciclado de cajas de batería expuesto en un reómetro de torque (el torque disminuye cuando es estabilizado).

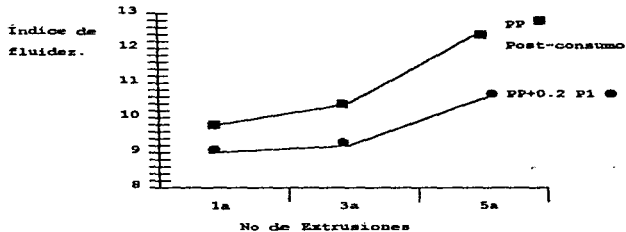
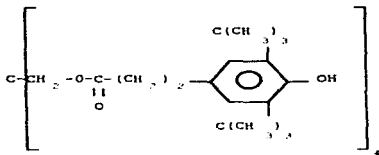


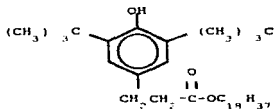
Fig. 6.3 Consistencia en el índice de fluidez del PP después de 5 pasos en un extrusor.

Estructuras

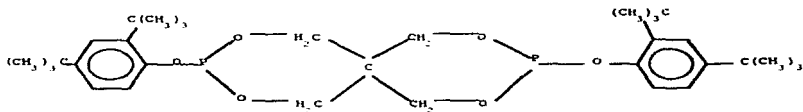
A01 = tetrakis [metilen (3,5-di-t-butil-4-hidroxihipocinamato)] metano



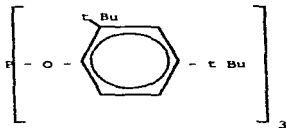
A02 = octadecil 3,5-di-t-butil-4-hidroxihipocinamato



P1 = bis (2,4-di-t-butilfenil) pentaeritritol difosfito



P3 = tris (2,4-di-t-butilfenil) fosfito



estabilizadores especiales para conservar las propiedades del material, se ha encontrado que Blendex 336 y Blendex 338 funcionan muy bien. Actualmente, los transformadores de PVC utilizan mezclas de PVC regranulado con material virgen, para no reducir la calidad del producto.

6.3. RPPC MEZCLADOS

Una gran fracción de los RPPC en los RSM consiste de mezclas que no son viables, económicamente, de ser separadas.

En la mayoría de las mezclas de plásticos sus componentes son inmiscibles, es decir, no forman una fase simple, sino que están separados en dos o más fases por fronteras que pueden estar muy bien marcadas o ser difusas. Con frecuencia, en una frontera marcada entre dos regiones poliméricas diferentes hay poca interpenetración molecular, dando lugar a una región mecánicamente débil. Ya que la falla es probable que se dé en las fronteras con baja adhesión, las propiedades físicas de tales mezclas inmiscibles tienden a ser más pobres que las de los componentes individuales.

Paul et al, estudiaron las propiedades de mezclas simuladas de RPPC, usando diferentes PE's, PS's, PVC's. Con estos materiales hicieron varias combinaciones, de tal manera que eran mezclas binarias o ternarias en diferentes proporciones y realizaron diagramas ternarios de propiedades mecánicas.⁽¹²⁾

Por ejemplo, en la figura 6.4 se muestra un diagrama obtenido con:

- 1) PEBD de Union Carbide densidad: 0.917
- 2) PS 685 de Dow
- 3) PVC de Union Carbide Copolímero VCM-VAM

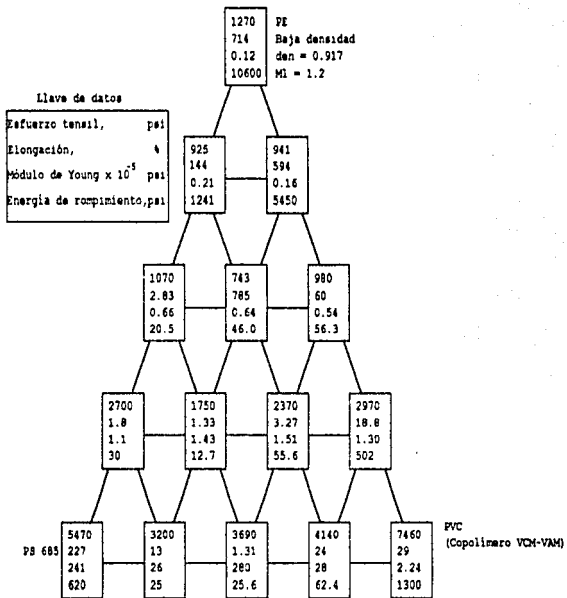


Fig. 6.4 Diagrama ternario de propiedades mecánicas de mezclas de PE, PS y PVC.

Encontrando que:

Los módulos de las mezclas son aproximadamente aditivos y pueden predecirse por la siguiente ecuación empírica:

$$E_b = E_1V_1 + E_2V_2 + E_3V_3 + \dots$$

donde E_b es el módulo de Young de la mezcla, E_1 , E_2 y E_3 son los módulos de los componentes individuales y V_1 , V_2 y V_3 son las fracciones de volumen de los componentes.

Las otras propiedades: esfuerzo tensil, elongación y energía de rompimiento no son aditivos, decrecen si uno se mueve de cualquier ápice o extremo. Una gráfica de cualquiera de estas propiedades contra composición, muestra un mínimo.

Si uno se mueve a lo largo de una mezcla binaria hacia un punto medio, las propiedades decrecen, el mínimo no cae exactamente en el punto medio pero tiende a desplazarse hacia el componente que indica un valor más bajo de la propiedad dada. Si la composición se mueve hacia el interior del triángulo, las propiedades decrecen aún más, por ejemplo, una mezcla de iguales partes de PE, PVC Y PS tienen la energía de rompimiento más baja de todas las mezclas.

En general, los residuos plásticos mezclados están caracterizados por un bajo esfuerzo o impacto y elongación. El esfuerzo tensil en plásticos mezclados está por debajo de las resinas vírgenes.

La compatibilidad general de diferentes polímeros se indica en la tabla 6.2. [22]

Tabla 6.2 Compatibilidad de Polímeros

Polímero	P B D	E B D	C O E	P E A D	P P	E P P	S P	A A N	P B S	V V C	N Y L O N	A C R I L	P P B E T
PELBD	1												
PEUBD	1	1											
Copo Etileno	1	1											
PEAD	1	1	1										
PP	4	2	2	4									
EPM/EPDM	4	4	3	4	1								
PS	4	4	4	4	4	4							
SAN	4	4	4	4	4	4	4						
ABS	4	4	4	4	4	4	4	1					
PVC	4	4	2	4	4	4	2	3					
Nylon	4	4	1	4	4	1	4	4	4				
PC	4	4	4	4	4	4	2	2	4	4			
Acrílico	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4		
PBT	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
PET	4	4	3	4	4	4	4	4	4	3	1	4	1
SBS	4	4	4	4	4	4	1	3	2	3	3	4	4

1 = excelente; 2 = buena; 3 = regular; 4 = no compatibles

6.3.1. PRINCIPIOS DE MISCIBILIDAD

Los polímeros químicamente diferentes usualmente son inmiscibles. Termodinámicamente puede entenderse mejor, porqué la inmiscibilidad es más común en pares de polímeros que en especies de bajo peso molecular.⁽³³⁾

Para que un proceso ocurra espontáneamente a temperatura constante, T , y a presión, P , es necesario que la energía libre de Gibbs, G , disminuya. Para dos polímeros que se disuelven uno a otro, estos cambios de energía libre de la mezcla, ΔG_{mez} están dados por: entalpía, ΔH_{mez} y entropía, ΔS_{mez} :

$$\Delta G_{mez} = \Delta H_{mez} - T \Delta S_{mez} \quad (6.1)$$

La entropía de la mezcla de una solución ideal está dada por:

$$\Delta S_{mez} = - R [n_1 \ln x_1 + n_2 \ln x_2] \quad (6.2)$$

donde n_1 y n_2 son las moles de los dos componentes y x_1 y x_2 son sus fracciones molares. Debido a que $x_i \leq 1$, $\ln x_i \leq 0$, entonces ΔS_{mez} generalmente es positivo. Esto es razonable, ya que la entropía está asociada con el desorden, y la solución es más desordenada que los componentes separados.

El incremento de ΔS_{mez} contribuye a una disminución en ΔG_{mez} , y esta es la principal fuerza conductora para que los materiales sean solubles.

La ecuación 6.2 para soluciones ideales exige que las moléculas de ambos componentes sean de igual tamaño, y usualmente esto no es cierto en mezclas de polímeros. Flory hizo una modificación:

$$\Delta S_{mez} = - R [n_1 \ln \phi_1 + n_2 \ln \phi_2]$$

donde, ϕ es la fracción de volumen que es igual a la fracción mol cuando las moléculas son de igual tamaño, con esta modificación $\Delta S_{mez} \neq 0$.

El número de moles está dado por $n_i = W_i / M_i$, W es el peso y M es el peso molecular. Para una mezcla de polímeros, M es muy grande y n es pequeña. Así ΔS_{mez} será menor para mezclas de polímeros que para mezclas con peso molecular bajo. El significado físico es que si los monómeros están enlazados para formar una cadena hay pocas maneras para que ellos se mezclen. A consecuencia de esto ΔS_{mez} es una fuerza conductora más pequeña para que los polímeros sean miscibles

que para especies con peso molecular bajo, así que los pares de polímeros miscibles es menos frecuente. En consecuencia, la miscibilidad de polímeros está más controlada por ΔH_{mez} que en el caso de mezclas de peso molecular bajo.

La teoría de ΔH_{mez} basada en interacciones de pares vecinos ha sido propuesta por Scatchard y Hildebrand:

$$\Delta H_{mez} = RT \chi_{n_1 \phi_2}$$

donde χ es el parámetro de interacción de Flory el cual describe las interacciones moleculares que pueden relacionarse a las interacciones potenciales de pares: ϵ_{11} , ϵ_{22} y ϵ_{12} entre segmentos moleculares por

$$\chi = (zAV_1/RT) [(\epsilon_{11} + \epsilon_{22})/2 - \epsilon_{12}]$$

donde z es el número de coordinación de red, A es el número de Avogadro y V es el volumen molar del componente 1. En una mezcla sin cambio de temperatura, la interacción ϵ_{12} es el promedio de ϵ_{11} y ϵ_{22} así:

$$\epsilon_{12} = (\epsilon_{11} + \epsilon_{22}) / 2$$

por lo tanto, χ y ΔH_{mez} son cero, en este caso está determinada por la contribución de ΔS_{mez} .

Para van der Waals, las fuerzas de dispersión entre segmentos ϵ_{12} es la media geométrica de ϵ_{11} y ϵ_{22} :

$$\epsilon_{12} = (\epsilon_{11} \epsilon_{22})^{1/2}$$

así

$$\chi = (zAV_1/RT) [(\epsilon_{11} + \epsilon_{22}) / 2 - (\epsilon_{11} \epsilon_{22})^{1/2}]$$

$$\chi = (zAV_1/RT) [(\epsilon_{11})^{1/2} - (\epsilon_{22})^{1/2}]^2$$

De este modo una cantidad positiva para las interacciones de van der Waals hacen que ΔH_{mez} sea positivo y contribuya a ΔG_{mez} , la cual promete miscibilidad. El término $(\epsilon_{11})^{1/2}$ está relacionado con el parámetro de solubilidad δ_1 por lo que

$$\chi = (V_1/RT) [\delta_1 - \delta_2]^2$$

una diferencia grande entre las δ 's hacen a ΔH_{mez} más positivo y menor la miscibilidad. Así las substancias tienden a ser miscibles si los valores de los parámetros de solubilidad son cercanos. Esta es una expresión cuantitativa de la frase "semejante disuelve a semejante" y que para ϵ 's constantes χ debe variar inversamente con T.

Una ΔG_{mez} negativa (y miscibilidad) pueden obtenerse si ΔH_{mez} es menor que ΔS_{mez} y esto ocurrirá si δ 's son muy cercanas.

6.3.2. MODIFICACION QUIMICA

Para mejorar las propiedades de sistemas inmiscibles es deseable incrementar la fuerza de la interfase, esto puede llevarse a cabo mediante:

- 1) Modificar uno o ambos componentes por técnicas tales como injertos o copolimerización para hacerlos más miscibles.
- 2) Llevar a cabo una reacción química para unir componentes en la interfase. La unión puede ser a través de reacciones químicas tales como injertos o a través de interacciones secundarias tales como enlace de hidrógeno o transferencia de carga.

3) Adicionar un agente espacial el cual enlaza dos fases, un ejemplo es un copolímero dibloque, un block que sea miscible con una de las fases y el otro con la otra fase. Tales materiales actúan como agentes amulsificantes para estabilizar suspensiones inmiscibles.

A) Compatibilizadores

Los plásticos presentes en los RSM consisten principalmente de PVC, PE, PS y PP como ya se mencionó. Estos materiales son mutuamente incompatibles. Los compatibilizadores ideales para cualquiera de dos plásticos, podría ser un polímero de cadena larga en el cual un extremo de la cadena pueda ser compatible con una fase y el otro extremo con la otra. Así, se ha propuesto el PE clorado (CPE), polímero funcionalizado, como un posible compatibilizador para la mezcla PE/PVC. (1)

El CPE se produce por cloración de partículas suspendidas de PEAD en agua. La reacción de funcionalización ocurre sólo en fase amorfa. El producto tiene una estructura semejante a un bloque en el cual algunos segmentos de la cadena son similares al PE y otros similares al PVC. Los polímeros de esta estructura suponen tener unas características semejantes a un surfactante las cuales permiten localizar preferentemente en el dominio enlaces en una mezcla de polímeros incompatibles (PE Y PVC), así el enlace se incrementa entre los dominios.

Al adicionar CPE en mezclas ternarias de PE, PVC y PS decrece el esfuerzo tensil y el módulo de Young y la energía de ruptura (una medida de dureza del material) indica un incremento similar al incremento de elongación.

Resultados obtenidos por la adición de CPE a una mezcla de RPPC indican considerables mejoras en las propiedades, ver la tabla 6.3. La mayoría de cambios pronunciados fueron observados en el esfuerzo al impacto de valor 0 a 2.83 ft-lb/in². También el CPE cambia la morfología de la mezcla, haciéndola una estructura fina en mezclas de PE y PVC.

La acción de los compatibilizadores poliméricos es similar a la de los surfactantes. En ambos un extremo de la cadena es soluble en la fase continua y el otro extremo es soluble en la fase dispersa. Sin embargo hay una diferencia substancial, las moléculas surfactantes tienen gran movilidad en el fluido, la cual le permite migrar libremente en la interfase. Los compatibilizadores de cadena molecular muy larga no tienen gran movilidad en el polímero fundido. Para lograr una adecuada concentración en la interfase se debe usar de 10 a 30%.

Tabla 6.3 Propiedades físicas de RPPC con diferentes porcentajes de CPE.⁽¹⁾

CPE/ mezcla RPPC	Elongación	tensil	Esfuerzo impacto
%	%	psi	ft-lb/in ²
0/100	11	1450	0
15/85	11.7	1715	0.45
17.5/82.5	12.7	1690	0.54
20/80	15.7	1715	0.76
22.5/77.5	17.7	1712	1.5
25/75	20	1600	1.6
27.5/72.5	22	1600	2.83

B) Agentes de entrecruzamiento

El entrecruzamiento químico, llevado a cabo por peróxidos es una manera efectiva de mejorar las propiedades mecánicas de RPPC mezclados.

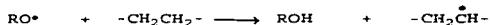
El PE puede ser entrecruzado combinándolo con un peróxido como peróxido de dicumilo o peróxido di-t-butil. El entrecruzamiento del PE se lleva a cabo arriba de la temperatura a la cual este plástico puede usarse. El PE entrecruzado es un sólido a la temperatura a la cual el PE no entrecruzado funde y fluye.⁽¹⁾

El entrecruzamiento se lleva a cabo en tres pasos:

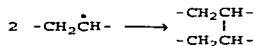
1) Descomposición del peróxido y formación de radicales peróxido:



2) Abstracción de hidrógeno de la cadena de PE:



3) Entrecruzamiento por acoplamiento de radicales del polímero:



Es probable que en una mezcla de plásticos con un apropiado peróxido no sólo las fases del polietileno se entrecrucen, sino también las otras fases y puede que ocurra algún entrecruzamiento en las interfases, lo cual mejora las propiedades de la mezcla.⁽¹⁾

6.4. EJEMPLOS DE INDUSTRIAS MUNDIALES DE RECICLADO SECUNDARIO

La industria que recupera los residuos plásticos se divide de manera general, en procesadores de PVC y procesadores de otros plásticos, puesto que el manejo de PVC requiere equipos especiales. A continuación se presentan algunos ejemplos de empresas recicladoras. (11. 15)

- La empresa Applied Polymer Research de Edmonton, Canadá, señala haber logrado un avance significativo en el reciclaje de plásticos mezclados y contaminados, mediante el desarrollo de una planta piloto.

- En el Reino Unido, la empresa Tomado Ltd, desarrolló un proceso que permite eliminar la mayoría de los contaminantes en plásticos como PS y PP y reprocesar dichos materiales hasta un estado casi virgen.

- Un ejemplo de cómo el reciclaje de plásticos mezclados puede producir utilidades, es el caso de la empresa Superwood Holdings, con base en Irlanda. La existencia de multitud de empresas en el mundo entero que operan bajo licencia de Superwood es una certificación del éxito de esta técnica.

El sistema se basa en el proceso Klobbie, que incorpora una etapa de extrusión con otra de flujo a baja presión para moldeo. La alimentación está compuesta por termoplásticos principalmente, tanto PEAD como PBBD y PP de ductos y tuberías de desecho, envases, bolsas y envolturas de plásticos flexibles. La separación de esta alimentación en diversos grupos de polímeros, para luego mezclarlos de acuerdo con formulaciones adecuadas al producto final, es un proceso muy caro por ser intensivo en mano de obra pero no es factible alimentar a la extrusora una mezcla variable. El

material se homogeniza y plastifica por la alta velocidad del extrusor adiabático (aproximadamente 350 rpm). El extrusor no requiere calentamiento externo, es suficiente el calor que se genera por la acción del desplazamiento del plástico a lo largo del tornillo, la velocidad alta genera un buen mezclado y un tiempo de residencia corto. El extrusor bombea el plástico fundido hacia los moldes.

- Uno de los procesos que mayor éxito en el reciclaje de plásticos mixtos es el de Remaker, que muele y funde los desechos plásticos para hacer productos moldeados. El proceso ha sido optimizado con el fin de poder utilizar gránulos de mezclas de composición variable, que son extendidas en el molde donde se calientan y comprimen para formar tablas o algún otro tipo de perfil.

- Otros procesos que han tenido éxito son el sistema Klobbie, usado por Superwood como se mencionó antes, que permite manufacturar grandes cantidades de perfiles sencillos a partir de desechos que pueden incluir papel y hoja de aluminio.

- La empresa belga F N Herstal desarrolló un sistema denominado F N Plastifier, que permite procesar 15 000 toneladas por año de mezclas de plásticos que contienen 65% de PE y PP y hasta 20% de PVC y 15% de PS. La máquina consta de una extrusora de tornillo corto ($L/D=5$) con un mecanismo interno de mezclado. La ventaja del sistema es que garantiza que el material permanezca en el estado plástico durante varios segundos, evitando la degradación térmica del PVC, y gracias a esto, puede dispersarse en la matriz formada por PE y PP. El proceso F N produce pellets que pueden ser convertidos a productos en equipo estandar para procesar plástico.

Otros materiales, como los plásticos termofijos, deben ser molidos y pulverizados y son utilizados como relleno en la mezcla. El producto resultante es apropiado para construir bardas, muelles canales de irrigación y mobiliario para exteriores.

- La empresa alemana Remaker Technik desarrolló un proceso semejante al anterior, habiendo mejorado el desempeño de las moldeadoras por inyección para el procesamiento de los desechos.

6.5. EJEMPLOS DE ALGUNAS EMPRESAS QUE RECICLAN EN EL D. F. Y ZONA METROPOLITANA (ZMCM)

Se visitaron algunas empresas que reciclan RPPC en el D.F. y Zona Metropolitana, las que se mencionan a continuación:

- RECIMEX, la cual tiene sus centros de acopio en los estacionamientos de la cadena de tiendas de autoservicio AURRERA. Esta empresa recupera los RPPC directamente de los consumidores y posteriormente los lleva a su planta ubicada en Tlanepantla donde lleva a cabo su proceso que consta de los siguientes pasos:

- separación manual
- molienda
- lavado con agua y detergente
- centrifugación
- extrusión
- peletizado.

Esta empresa recicla PET (polietilen tereftalato), PEBD y PEAD, con una capacidad instalada de 1,250 ton/mes, 250 ton/mes y 300 ton/mes respectivamente.

También recupera PP, PVC y PS, los cuales compacta y vende a otras empresas.

El PET lo vende a CELANESE para producir fibra textil y el PEBD a otras empresas que fabrican bolsas para la basura.

- Recuperadora y Maquiladora de plástico S. A. de C. V. ubicada en Naucalpan compra residuos plásticos industriales y RPPC, estos últimos los compra a los pepenadores de los grandes tiraderos. Su proceso consiste en:

- separación manual
- triturado
- extrusión
- peletizado.

Esta empresa recicla principalmente PEAD, PEBD, PP y PET, y lo vende a empresas que fabrican escobas, cubetas, tacones, bolsas para basura.

- Convertidora Industrial de Materiales S. A. de C. V., ubicada en Iztapalapa, se dedica a la fabricación de tarimas hechas de PE, PP, PET Y PC (policarbonato). Compran directamente a la Planta de Selección y Tratamiento de Residuos Sólidos de San Juan de Aragón tiene una capacidad instalada de 50 ton/mes.

- Reciclados Industriales Ecológicos S. A. de C. V. obtiene los RPPC en dos centros de acopio instalados en Azcapotzalco, fabrican madera plástica y obtienen como producto final: macetas, cajas para composta, bancas para parques, cercas para jardín.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1) En el Distrito Federal y en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) no se han llevado a cabo programas tanto de recuperación como de reciclado de RPPC a nivel institucional.
- 2) En la mayor parte de la ciudadanía existe muy poco interés por separar los residuos, ya que no existe un sistema de recolección adecuado para la recuperación de los RSM.
- 3) Existe una problemática por la cual no se ha desarrollado la industria recicladora que se puede resumir en lo siguiente:
 - a) No existe una reglamentación para que todas las empresas de empaques de plástico usen el sistema de codificación creado por la SPI, por lo que hacen que los materiales se confundan.
 - b) En México no se ha desarrollado tecnología adecuada para el reciclado y la tecnología extranjera es muy costosa.
 - c) No hay apoyo financiero por parte de las instituciones.
- 4) Debe crearse una campaña a nivel nacional que tenga como objetivo la Reducción, la Colecta selectiva, la Reutilización y el Reciclaje, con el fin de disminuir las cantidades de RSM.
- 5) Si bien es cierto, que los plásticos se mantienen inalterables por gran tiempo, y no "contaminan" sí alteran el equilibrio ecológico al ocupar grandes extensiones de

terreno y modificar la composición del suelo, por lo que se debe promover su reciclaje.

6) En este momento de crisis, las empresas recicladoras hacen un gran esfuerzo por subsistir, por lo que deben ser apoyadas económicamente, ya que están creando fuentes de empleo.

7) El manejo de los RSM es bastante costoso y problemático, por lo que se sugiere que en cada delegación se construyan plantas de tratamiento de RSM, para disminuir costos en el traslado y tener un mayor control sobre los mismos.

B. B I B L I O G R A F I A

1. Leidner, J., *Plastics Waste, Recovery of Economic Value*, Marcel Dekker, Inc., New York, 317, (1981).
2. KlemchuK, P. P. y Thompson, T., "Stabilization Recycled Plastics" *ACS Symposium Series 513 Emerging Technologies in Plastics Recycling*, American Chemical Society, Washington, D. C., (1992).
3. Gonzáles, Z. G., *Aspectos económicos del Reciclado de PEAD*, México, Tesis, Fac. Química, UNAM, (1992).
4. Instituto Mexicano del Plástico Industrial S. C., "Reciclado de plásticos", México D. F., (1995).
5. Dirección General de Infraestructura y Equipamiento, Subsecretaría de Desarrollo Urbano, SEDESOL, (1994).
6. Castillo, B. H., *La Sociedad de la Basura: Caciquismo en la Ciudad de México*, 2ª ed., México, UNAM IIS, 205, (1990).
7. Andrade, A., "Genera la zona conurbada y el D. F. 20,000 toneladas de basura diarias" *El Universal México D.F.*, 14 febrero, 3, (1992).
8. Bennet, A. R., "Recycled Plastics Product applications and potential" *ACS Symposium Series 513 Emerging Technologies in Plastics Recycling*, American Chemical Society, Washington, D. C. 27-38, (1992).

9. Castillo, B. H., "Basura, un recurso desperdiciado", *Federalismo y Desarrollo, Banobras, México, set-oct, 74-81, (1995).*
10. Ochoa S. G. y otros, "Los residuos sólidos municipales, ¿Un recurso aprovechable?", *Federalismo y Desarrollo, Banobras, México, set-oct, 90-98, (1995).*
11. Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), "Anuario Estadístico de la Industria Química Mexicana" México, (1996).
12. Conde, D. M. Simposio Grupo Hulero, México (1993).
13. Deffis, C. A., *La Basura es la Solución*, Arbol editorial , México, 277, (1994).
14. Dirección de Proyectos de Residuos Sólidos para la Preservación del Medio Ambiente, Subsecretaría de Equipamiento Urbano, SEDESOL, (1994).
15. Careaga, J. A., "Manejo y reciclaje de los residuos de envases y embalajes", SEDESOL, INE, 159, (1993).
16. Environmental Protection Agency (EPA), *Plastic Wastes Management, Control, Recycling, and Disposal*, Noyes Data Corporation, New Jersey, 377, (1991).
17. Vesilind, A., Rimer, A. "Unit Operations in resource recovery engineering", Prentice Hall Inc., USA, 1981.
18. Entrevista con el Ing. Sebastián Alonso Cruz de RECIMEX.

19. Sánchez, J., Cavanna, M. M., García, H., "Recycling Urban Solid Waste", ENADIMSA, España, Technische Universität, Berlín, (1978).
20. Howell, S. G., "A ten year review of plastics recycling" *Journal of Hazardous Materials*, 29 Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam 143-164 (1992).
21. Careaga, J. A., "Elementos para una política Nacional de manejo de residuos sólidos", *Federalismo y Desarrollo, Banobras*, nov-dic, 73-85, (1995).
22. Hegberg, B. A. y otros, "Mixed Plastics Recycling Technology". Noyes Data Corporation, New Jersey, 207, (1992).
23. Instituto Mexicano del Plástico Industrial, S. C. "Reciclado de Plásticos", México, 18, (1995).
24. Abbas, K. B., Knutsson, A. B., "New thermoplastics from old", *Chemtech*, Aug, (1978).
25. Kaminsky, W. "Pyrolysis of Polymers" *ACS Symposium Series 513 Emerging Technologies in Plastics Recycling*, American Chemical Society, Washington, D. C., 60-73, (1992).
26. Morrison T. R. y Boyd N. R., *Química Orgánica*, Fondo Educativo Interamericano, México, (1973).
27. Directorio de la Industria Química Mexicana, ANIQ, (1994).
28. Rodríguez, F. *Principios de sistemas de polímeros*, El manual moderno, México, (1984).

29. Rubin, I. I., *Plastics materials and Technology*, J. Wiley, New York, (1990).
30. Montaña, A. E., *Integración de la petroquímica en México* Fac. Química, UNAM, 302, (1992).
31. Dietz, S. "Phosphite Stabilizers in Postconsumer Recycling", *ACS Symposium Series 513 Emerging Technologies in Plastics Recycling*, American Chemical Society, Washington, D. C., 134-146, (1992).
32. Paul, D. R. y otros, "The Potential for Reuse of Plastics from Solid Wastes", *Polim. Eng. Sci.* 12, 3, (1972).
33. Stein, S. R., *Miscibility in Polymer Recycling*, *ACS Symposium Series 513 Emerging Technologies in Plastics Recycling*, American Chemical Society, Washington, D. C., 39-48, (1992).

G L O S A R I O

ABS	acrilonitrilo - butadieno - estireno
Cl ⁻	ión cloruro
CN ⁻	ión cianuro
COCl ₂	fosgeno, oxiclорuro de carbono
Copo Etileno,	copolímeros de etileno
Copo E	
CPE	polietileno clorado
EPM/EPDM	hules etilen-propileno, grupo de elastómeros obtenidos por copolimerización de etileno y propileno para EPM y un tercer monómero (dieno) para EPDM
HCl	cloruro de hidrógeno
HCN	cianuro de hidrógeno
H ₂ S	ácido sulfhídrico
LLDPE	linear low density polyethylene
MMA	metacrilato de metilo
NH ₃	amoníaco
NO	óxido de nitrógeno
PA	poliamida
PBT	polibutilen tereftalato
PC	policarbonato
PCDD	dibenzodioxina policlorinada
PCDF	debenzofurano policlorinado
PE	polietileno
PEAD	polietileno de alta densidad
PEBD	polietileno de baja densidad
PELBD	polietileno lineal de baja densidad
PEUBD	polietileno ultra baja densidad
PET	polietilén tereftalato
PMMA	polimetacrilato de metilo
PMS	polimetil estireno
PP	polipropileno

PS	poliestireno
PU	poliuretano
PVC	policloruro de vinilo
PVDC	policloruro de vinilideno
RPPC	Residuos Plásticos Post-consumo
RSM	Residuos Sólidos Municipales
RCOOH	ácido carboxílico alifático
SAN	copolímero estireno - acrilonitrilo
SB	copolímero estireno - butadieno
SBS	estireno - butadieno - estireno
SO ₂	dióxido de azufre
SO ₃	trióxido de azufre
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México