

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



*Diseño de un proceso de reciclaje de polímeros de desecho común para la obtención de un producto de valor que pueda reprocesarse*

Trabajo de graduación presentado por Karla Gabriela Gudiél Solares para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala

2012



*Diseño de un proceso de reciclaje de polímeros de desecho común para la obtención de un producto de valor que pueda reprocesarse*

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



*Diseño de un proceso de reciclaje de polímeros de desecho común para la obtención de un producto de valor que pueda reprocesarse*

Trabajo de graduación presentado por Karla Gabriela Gudiél Solares para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala

2012


Vo. Bo:

Tribunal

(f)   
Ingeniero Luis Ernesto Núñez

Asesor

Colegiado No. 1191

(f)   
Ingeniero Gamaliel Zambrano

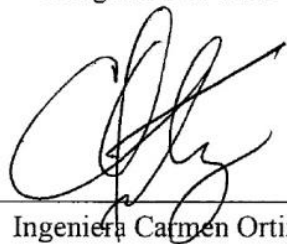
Director de Ingeniería Química

Colegiado No. 686

(f)   
Ingeniero Luis Ernesto Núñez

Asesor

Colegiado No. 1191

(f)   
Ingeniera Carmen Ortiz

Departamento de Ingeniería Química

Colegiado No. 639

Fecha de aprobación: Guatemala, 25 de enero de 2012.

A Dios, por acompañarme en cada momento, ser mi fuerza y permitirme alcanzar esta meta.

A mi familia, por su apoyo y cariño durante este camino.

A la Fundación Juan Bautista Gutiérrez, por su enorme ayuda en este proceso.

A mis amigos, por compartir conmigo y alentarme en los momentos difíciles.

## CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	2
A. Polímeros .....	2
1. Estructura de los polímeros.....	3
a. Polimerización .....	3
b. Cristalinidad.....	5
c. Temperatura de transición vítrea .....	6
2. Clasificación de los polímeros .....	6
a. Según su procedencia.....	6
b. Según su estructura.....	6
c. Según su composición.....	7
d. Según su respuesta mecánica ante el calor.....	8
3. Propiedades de los polímeros termoplásticos.....	8
a. Termoplásticos comunes.....	9
4. Propiedades de los plásticos termofijos o termoestables.....	10
5. Aditivos en los plásticos.....	11
a. Plastificantes.....	11
b. Antioxidantes y aditivos de protección contra la radiación ultravioleta.....	11

c. Rellenos.....	11
d. Colorantes.....	11
e. Retardantes de flama .....	11
f. Lubricantes.....	12
B. Producción y demanda de los plásticos a nivel internacional .....	12
C. Problemática actual respecto al consumo y desecho masivo de plástico.....	14
D. Desechos plásticos en Guatemala.....	15
E. Reciclaje de plásticos.....	16
1. Sistema de identificación de polímeros industriales SPI.....	17
2. Opciones de recuperación de desechos plásticos.....	17
a. Reciclaje mecánico.....	18
b. Reciclaje químico.....	18
c. Recuperación energética.....	18
3. Situación del reciclaje a nivel internacional.....	19
4. Situación del reciclaje en Guatemala.....	20
F. Proceso y tecnología del reciclaje mecánico de plásticos.....	21
1. Recolección de plásticos.....	21
2. Clasificación .....	21
a. Clasificación manual .....	22
b. Clasificación por densidad.....	22
c. Clasificación mediante aire (ciclones).....	24
d. Flotación con espuma (Froth Flotation) .....	24
e. Separación electrostática.....	25
f. Clasificación óptica.....	25
g. Métodos de clasificación basados en espectroscopía.....	27
h. Sistema de marcadores fluorescentes .....	27
i. Clasificación por diferencias en la temperatura de fusión.....	28
j. Disolución selectiva.....	28
3. Molienda .....	29
4. Lavado.....	29

5. Secado.....	29
6. Extrusión y filtración.....	30
7. Manufactura de productos finales.....	30
III. JUSTIFICACIÓN.....	31
IV. OBJETIVOS.....	32
A. General.....	32
B. Específicos.....	32
V. PROBLEMA A RESOLVER.....	33
VI. METODOLOGÍA.....	34
A. Etapa preliminar de investigación.....	34
B. Etapa experimental.....	34
C. Etapa de diseño del proceso.....	35
D. Etapa de diseño y dimensionamiento de equipo.....	35
E. Etapa de análisis económico.....	35
F. Etapa final.....	35
VII. RESULTADOS.....	36
VIII. DISCUSIÓN.....	49
IX. CONCLUSIONES.....	56
X. RECOMENDACIONES.....	57
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	59

XII. APÉNDICE.....	63
A. Resultados de pruebas experimentales de separación de polímeros por densidad.....	63
B. Resultados cualitativos de pruebas experimentales de lavado de plásticos post-consumo.....	67
C. Balance de masa.....	68
1. Balance de masa en cada etapa del proceso.....	70
2. Balance global de masa.....	77
D. Dimensionamiento de equipo.....	78
1. Tanques.....	78
2. Transportadores de tornillo.....	79
3. Potencia de calentadores necesarios para tanques de lavado a altas temperaturas.....	81
4. Potencia requerida por el compresor.....	82
5. Otros equipos.....	84
6. Datos calculados en el dimensionamiento de equipo.....	85
E. Balance de energía.....	87
F. Consumo de agua durante el proceso.....	89
G. Estimación de la inversión inicial.....	90
1. Índice de M&S.....	90
2. Índice CE.....	92
3. Costos de importación e instalación de equipo.....	92
4. Datos calculados e inversión inicial total.....	93
H. Estimación del período de recuperación de la inversión (PRI).....	97
1. Ingresos diferenciales.....	97
2. Egresos diferenciales.....	97
3. Cálculo del período de recuperación de la inversión en equipo.....	98
I. Clasificación de materiales sólidos a granel según sus características.....	100
J. Cuadro de capacidad de transportadores de tornillo.....	101

K. Información necesaria para calcular potencia en transportadores de tornillo.....	102
L. Diagrama de bloques del proceso.....	104

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Propiedades de termoplásticos comunes.....	10
2. Desechos sólidos domiciliarios generados en los departamentos de Guatemala durante el año 2009.....	15
3. Sistema internacional de identificación de resinas.....	17
4. Eficiencia de separación de polímeros termoplásticos (HDPE, PP, LDPE, PVC, PET, PS) mediante sus diferencias por densidad.....	36
5. Resultados cualitativos del lavado de PET post-consumo a una temperatura de 70-75 °C por un período de 12 min.....	36
6. Propuesta de sistema de recolección.....	37
7. Descripción de la primera parte del proceso de reciclaje de plásticos rígidos.....	39
8. Descripción de las etapas finales del proceso de reciclaje de PET a partir de la corriente de no poliolefinas (separada en la etapa No. 9).....	40
9. Descripción de las etapas del proceso referentes al tratamiento de poliolefinas después de haber sido separadas en la etapa No. 9.....	40
10. Descripción de las etapas finales del proceso de reciclaje de HDPE después de que éste fue separado en la etapa No. 11B.....	41
11. Descripción de las etapas finales del proceso de reciclaje de PP después de que éste fue separado en la etapa No. 11B.....	41
12. Especificaciones de equipo seleccionado para el proceso de reciclaje propuesto.....	42
13. Balance global de energía .....	48
14. Inversión inicial del proyecto (equipo) y período de recuperación de la misma...	48
15. Cantidades de polímeros contenidos en las mezclas a separar mediante diferencias en densidad.....	63

16. Separación de poliolefinas de no poliolefinas a partir de una mezcla de 6 polímeros termoplásticos (HDPE, PP, LDPE, PVC, PET, PS) mediante sus diferencias en densidad utilizando agua como medio de separación.....	63
17. Separación de HDPE a partir de una mezcla de 3 polímeros termoplásticos (HDPE, PP, LDPE) mediante sus diferencias en densidad utilizando solución de etanol al 50% v/v como medio de separación.....	64
18. Separación de PS a partir de una mezcla de 3 polímeros termoplásticos (PS, PVC, PET) mediante sus diferencias en densidad utilizando solución de NaCl al 25% p/v como medio de separación.....	64
19. Condiciones de lavado de plásticos triturados post-consumo y resultados obtenidos.....	67
20. Caracterización estimada de la corriente de desechos plásticos rígidos post-consumo.....	68
21. Características de la corriente total de entrada que se recolecta.....	69
22. Composición del 95% de plásticos rígidos desechados en la corriente recolectada.....	69
23. Desglose de la composición final en la corriente total de desechos.....	69
24. Estimación de la generación de desechos plásticos en Guatemala.....	70
25. Composición másica de la corriente de entrada.....	71
26. Balance de masa en las etapas de la primera parte del proceso.....	73
27. Balance de masa en las etapas correspondientes al procesamiento de PET.....	74
28. Balance de masa en las etapas correspondientes al tratamiento de poliolefinas....	75
29. Balance de masa en las etapas correspondientes al procesamiento de HDPE.....	76
30. Balance de masa en las etapas correspondientes al procesamiento de PP.....	76
31. Balance global de masa en la línea de procesamiento de residuos plásticos.....	77
32. Producción anual para su posterior procesamiento en la industria manufacturera de productos plásticos.....	78
33. Capacidades de diseño del equipo requerido en el proceso.....	85

34. Consumo energético por equipo.....	87
35. Consumo energético global.....	89
36. Manejo de las soluciones durante el proceso.....	89
37. Requerimiento de agua en el proceso de reciclaje.....	90
38. Porcentajes utilizados para la estimación de los costos involucrados por importación de equipo.....	93
39. Porcentajes utilizados para la estimación de los costos de instalación del equipo en una planta de procesamiento de sólidos.....	93
40. Inversión inicial total del proyecto.....	94
41. Costos de inversión en equipo.....	95
42. Estimación del flujo de caja.....	99
43. Clasificación del material.....	100
44. Capacidades de transportadores de tornillo horizontales.....	101
45. Factores “D”.....	102
46. Tabla de materiales sólidos.....	102
47. Capacidad de torque en transportadores de tornillo.....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Formación de polietileno.....	3
2. Efecto del peso molecular y grado de polimerización sobre la resistencia y viscosidad de los polímeros.....	4
3. Estructuras de los polímeros.....	7
4. Producción mundial de plásticos (1950-2009).....	12
5. Demanda de plásticos en Europa por segmentos de aplicación en el año 2009....	13
6. Demanda de plásticos en Europa por tipo de resina (2009).....	13
7. Demanda de plásticos por segmentos de aplicación y por resina en Europa durante el año 2009.....	14
8. Composición de la basura domiciliar generada en Guatemala durante el año 2009.....	16
9. Cadena de valor de los plásticos durante su ciclo de vida en Europa durante el año 2009.....	19
10. Crecimiento continuado de reciclaje y recuperación energética en Europa durante 1995-2007.....	20
11. Destino de los residuos y desechos sólidos que ingresaron al relleno sanitario de Bárcenas, Villa Nueva en el año 2009.....	21
12. Esquema de un hidrociclón utilizado para separación de plásticos por densidad...	24
13. Separación de PET y PVC mediante un separador triboeléctrico de tambor (TDS por sus siglas en inglés).....	25
14. Tecnología de clasificación óptica.....	26
15. Diagrama de flujo cuantitativo del proceso de reciclaje.....	38
16. Diseño propuesto de los tanques utilizados en las etapas de separación por densidad.....	47
17. Balance de masa global (Diagrama de entradas y salidas).....	48

18. Partículas de 10 mm de HDPE (izquierda) y mezcla de LDPE y PP (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.....	64
19. Partículas de 6 mm de HDPE (izquierda) y mezcla de LDPE y PP (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.....	65
20. Partículas de tamaño variable de HDPE (izquierda) y mezcla de LDPE y PP (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.....	65
21. Partículas de 10 mm de PS (izquierda) y mezcla de PET y PVC (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.....	65
22. Partículas de 6 mm de PS (izquierda) y mezcla de PET y PVC (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.....	66
23. Partículas de tamaño variable de PS (izquierda) y mezcla de PET y PVC (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.....	66
24. Plástico triturado antes (izquierda) y después (derecha) del proceso de lavado realizado a cabo a escala de laboratorio.....	67
25. Diagrama de entradas y salidas en la primera etapa del proceso.....	71
26. Diagrama de bloques del proceso.....	104

## **RESUMEN**

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar un proceso de reciclaje mecánico de polímeros rígidos post-consumo a manera de aprovechar la abundancia de desechos plásticos que existe en la actualidad. Asimismo, proveer una base técnica para la generación futura de proyectos de reciclaje en Guatemala. Para esto se realizó una revisión bibliográfica sobre las generalidades de los polímeros, consumo y demanda a nivel internacional, situación actual de reciclaje a nivel nacional e internacional y sobre el proceso de reciclaje mecánico. A partir de lo anterior se determinó la capacidad de procesamiento de desechos plásticos (4000 kg/h) y se propuso un sistema de recolección. Se establecieron las etapas y secuencia de éstas en el proceso de reciclaje (clasificación y procesamiento) de PET, HDPE y PP. Se realizaron balances de masa y energía, obteniendo como resultado un diagrama de flujo cuantitativo del proceso diseñado. Se determinó que el gasto energético por unidad de masa de producto es de 1.24 kW-h/kg pellets reciclados. En el proceso se consideró que los productos finales serán destinados a la producción de fibra de poliéster y a la obtención de productos de rotomoldeo. La inversión inicial en equipo para la puesta en marcha del proyecto fue de \$1,435,222.84 (Q89,652,147.03), cuyo período de recuperación es menor a un año.

## **ABSTRACT**

The main purpose in this paper was the design of a mechanic recycling process having post-consumer rigid polymers as raw material. This election was made in order to use the abundance of plastic waste that currently exists. Also, to provide a technical basis for future recycling projects in Guatemala. The main characteristics of the polymers, its consumption, international demand, actual recycling situation and technologies in the mechanical recycling process were found in a literature review. The plastic waste process capacity determined was 4000 kg/h, and a collection system was proposed. Were set the stages and their sequence in the recycling process (sorting and processing) of PET, HDPE and PP. Based on the mass and energy balance, it was developed a quantitative flowchart of the designed process. It was determined that the power consumption per unit mass of product is 1.24 kW-h/kg recycled pellets. In the proposed process, the final products are intended for the production of polyester fiber and obtaining rotomolding products. The initial investment in equipment for the implementation of these project was \$1,435,222.84 (Q89,652,147.03), whose payback period is lower than one year.

## I. INTRODUCCIÓN

El reciclaje consiste en un proceso de tratamiento físico, químico y/o mecánico que se aplica a materiales que ya han sido utilizados (productos de desecho industrial o doméstico) con el propósito de transformarlos y reintroducirlos en un ciclo de vida. La idea de reciclar nace como una forma eficaz de eliminar los desechos, así también debido al agotamiento de los recursos y ante la perspectiva económica de generar utilidades a partir de materiales que aún tienen valor energético. Este tratamiento se puede llevar a cabo con diferentes tipos de desechos, entre éstos: papel y cartón, plástico (polímeros), vidrio, aluminio, entre otros.

El reciclaje de polímeros es un proceso de suma importancia, pues a pesar de que cada familia de polímeros presenta propiedades particulares, todos se caracterizan por ser no biodegradables, lo cual causa acumulación de los mismos y representa un problema grave de contaminación para la humanidad. Existen diferentes formas de recuperación y aprovechamiento de los desechos plásticos, sin embargo el presente trabajo se centra en la recuperación mediante el proceso de reciclaje mecánico, es decir que sólo se llevan a cabo etapas de transformación física y no química.

El trabajo a continuación consiste en el diseño de un proceso de reciclaje mecánico de plásticos de desecho común (post-consumo) que permite obtener un producto de valor capaz de ser utilizado como materia prima en la industria manufacturera de nuevos productos plásticos. Específicamente, los productos finales obtenidos en el proceso de reciclaje propuesto están destinados a la fabricación de fibra sintética de poliéster y productos de rotomoldeo tal como tanques de almacenamiento de agua, entre otros.

El diseño del proceso involucra una línea de tratamiento de estos desechos, además de varias etapas para la clasificación de los polímeros a reciclar. El proceso se diseñó con el objetivo de recuperar (reciclar) 3 termoplásticos: PET, HDPE y PP. Para lograr los objetivos del presente trabajo se realizó una revisión bibliográfica que se da a conocer en la sección de antecedentes, así mismo se describe la fase experimental y se presentan los resultados obtenidos para el diseño, en donde se muestran balances de masa y energía para la capacidad especificada de las líneas de reciclaje.

## II. ANTECEDENTES

### A. Polímeros

La palabra *plásticos* fue utilizada por primera vez como un sustantivo en el año 1909, y ésta se utiliza comúnmente como sinónimo de *polímeros*. La palabra *plástico* se deriva del griego *plastikos*, que significa: capaz de ser moldeado y formado. Los plásticos se pueden formar, maquinar, fundir y unir en diversas formas con facilidad. Sin embargo, los metales, la arcilla y otros materiales también se pueden moldear, pero dicho nombre ha llegado a denominar específicamente a un grupo de sólidos orgánicos que pueden hacerse fluir con facilidad mediante calor o presión o ambos en formas con valor comercial. Los plásticos constituyen uno de los numerosos materiales poliméricos y se forman de moléculas extremadamente grandes denominadas *macromoléculas*. (Kalpakjian & Schmid, 2008) (Doyle *et al*, 1988)

La palabra *polímero* se deriva del griego *poli* y *meros*, que significan muchas y partes, respectivamente; dicha palabra se utilizó por primera vez en 1866. Los primeros polímeros se fabricaron con materiales orgánicos naturales a partir de productos animales y vegetales. El primer polímero fabricado por el hombre, o también denominado *polímero sintético*, fue un fenol formaldehído desarrollador en 1906. El desarrollo de la tecnología moderna de los plásticos se inició en la década de 1920, cuando las materias primas necesarias para fabricar polímeros se extrajeron de productos del carbón y del petróleo. (Kalpakjian & Schmid, 2008) (Vincent *et al*, 2006)

Son muchos los productos fabricados con polímeros, entre ellos los de consumo habitual e industrial, tal como los recipientes para alimentos y bebidas, empaques, artículos de señalización, partes de computadoras y monitores, textiles, material médico, espumas, pinturas, blindajes de seguridad, juguetes, aparatos domésticos y electrodomésticos, lentes, engranes, productos eléctricos y electrónicos, carrocerías y componentes para automóviles, entre otros. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Los polímeros han desplazado de manera creciente a los componentes metálicos utilizados en la construcción de automóviles, aeronaves civiles y militares, artículos deportivos, juguetes, electrodomésticos y equipo de oficina; esto se debe a sus múltiples, únicas y diversas propiedades que se ajustan en forma particular a muchos desarrollos modernos. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Los polímeros se caracterizan por ser resistentes a la corrosión y a los productos químicos. Además, estos son de peso ligero, lo cual los hace adecuados para accesorios en la aviación comercial y ha ayudado a aligerar varios implementos manuales. Los polímeros son buenos aisladores eléctricos y buenos aisladores del calor, son resistentes a la corrosión y a los productos químicos. Su principal ventaja estructural es una relación alta de resistencia a peso. La resistencia a la tensión de algunos plásticos es aproximadamente de 7 MPa, sin embargo la mayoría varía de 35 a 140 MPa, pero algunos plásticos reforzados tienen resistencias que llegan hasta 3 GPa. (Kalpakjian & Schmid, 2008) (Doyle *et al*, 1988)

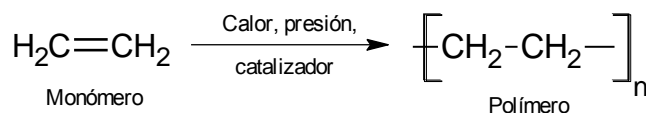
Entre otras ventajas de los polímeros, se puede mencionar la reducción del ruido, amplias opciones de colores y transparencias, facilidad de manufactura y posibilidades de diseño complejo y costo

relativamente bajo. Otras características pueden ser deseables o no dependiendo de la aplicabilidad, entre estas: baja resistencia y rigidez, alto coeficiente de expansión térmica, gama de temperatura útil baja: hasta 350 °C, menor estabilidad dimensional en servicio por cierto período. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Debido al progreso de la industria del plástico, existen más de 30 familias químicamente distintas de polímeros sintéticos, cientos de compuestos y miles de productos, con una diversidad igualmente extensa de propiedades. (Kalpakjian & Schmid, 2008) (Doyle *et al*, 1988)

**1. Estructura de los polímeros.** Los polímeros están formados por moléculas de gran tamaño, lo cual las distingue de la mayoría de las composiciones químicas orgánicas. Los polímeros son moléculas de cadena larga que se forman por *polimerización*, es decir, mediante el enlace y el enlace cruzado de diferentes monómeros. Un *monómero* es el elemento básico de un polímero, la palabra *mero* indica la unidad repetitiva más pequeña. El término polímero indica: muchos meros, que por lo general se repiten cientos o miles de veces en una estructura similar a una cadena. La mayoría de los monómeros son materiales orgánicos en los que los átomos de carbono se unen mediante enlaces covalentes, es decir compartiendo electrones, con otros átomos. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Figura 1. Formación de polietileno.



(Kalpakjian & Schmid, 2008)

**a. Polimerización.** Los monómeros tienen la capacidad de unirse como polímeros en unidades repetitivas para producir moléculas más y más largas mediante un proceso químico llamado *reacción de polimerización*. Los polímeros sintéticos se clasifican según su método de síntesis o proceso de polimerización: *por condensación* o *por adición*. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Los *polímeros por condensación* se producen por la formación de enlaces entre dos reactivos bifuncionales (dos tipos de meros). Una de las características de esta reacción es que se condensan productos derivados, tal como el agua. A estos también se les llama *polímeros de crecimiento en pasos o etapas*, ya que la molécula del polímero crece etapa por etapa hasta que se consume uno de los reactivos y cada enlace en el polímero se forma de manera independiente de los otros. (Kalpakjian & Schmid, 2008) (McMurry, 2004)

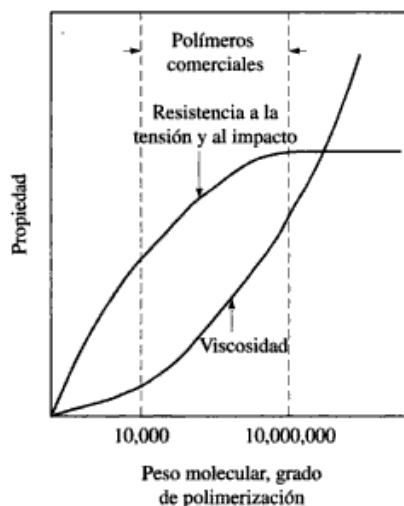
La *polimerización por adición* también es llamada *polimerización por crecimiento en cadena*. En este proceso el enlace se realiza sin productos derivados de la reacción. Se le llama “reacción en cadena” debido a la rapidez con que se forman simultáneamente las moléculas largas, por lo general en unos cuantos segundos. La velocidad de reacción en este proceso es mucho mayor que en la reacción por condensación. En una reacción en cadena, un iniciador se adiciona a un doble enlace carbono-carbono de un sustrato insaturado (monómero), formando un intermediario reactivo. Este intermediario reacciona con

una segunda molécula del monómero y da un nuevo intermediario, el cual reacciona con una tercera unidad del monómero, etcétera. (Kalpakjian & Schmid, 2008) (McMurry, 2004)

El iniciador en la reacción en cadena puede ser un radical (como en la polimerización del etileno), un ácido (como en la polimerización del isobutileno) o un anión. La polimerización por radicales es la más común y se puede efectuar prácticamente con cualquier monómero vinílico. (McMurry, 2004)

**Peso molecular.** El peso molecular del polímero es la suma de los pesos moleculares de los meros en una cadena representativa del mismo. Cuanto mayor sea el peso molecular, mayor será la longitud promedio de la cadena del polímero. La mayoría de los polímeros comerciales tienen un peso molecular de entre 10,000 y 10,000,000. Dado que la polimerización es un evento aleatorio, las cadenas de polímero se producen de diferentes longitudes, longitudes que caen dentro de una curva de distribución normal. Usualmente se expresa el peso molecular promedio del polímero en una base estadística. A la distribución de los pesos moleculares en una cadena se le denomina *distribución del peso molecular*, y ésta tiene una fuerte influencia en las propiedades del polímero. Un ejemplo de lo anterior es que, la resistencia a la tensión y al impacto, la resistencia al agrietamiento y la viscosidad en el estado fundido del polímero, aumentan al incrementarse el peso molecular, tal como se muestra en la Figura 2. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Figura 2. Efecto del peso molecular y grado de polimerización sobre la resistencia y viscosidad de los polímeros.



(Kalpakjian & Schmid, 2008)

**Grado de polimerización.** El grado de polimerización se define como la relación del peso molecular del polímero al peso molecular de la unidad repetitiva, y convenientemente se expresa el tamaño de la cadena de un polímero en términos del grado de polimerización. Al igual que el peso molecular, el grado de polimerización tiene un efecto en las propiedades del polímero, tal como la viscosidad (Figura 2).

Esto último es de suma importancia ya que la viscosidad elevada afecta la factibilidad de formado, por lo que eleva el costo global de procesamiento. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**Enlace.** Durante el proceso de polimerización, los monómeros se unen mediante enlaces covalentes para formar la cadena del polímero. Los enlaces covalentes también son llamados enlaces primarios debido a su resistencia. Las cadenas de polímero también se mantienen unidas mediante enlaces secundarios o enlaces más débiles, tal como los que se producen por fuerzas de Van der Waals. Los enlaces secundarios son más débiles que los primarios en uno o dos órdenes de magnitud. El aumento de la resistencia y de la viscosidad que se muestra en la Figura 2, se debe en parte a que cuanto más larga sea la cadena de polímero, mayor será la energía necesaria para vencer la resistencia combinada de los enlaces secundarios. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**b. Cristalinidad.** Algunos polímeros como el polimetilmetacrilato, el policarbonato y el poliestireno suelen ser amorfos, es decir que las cadenas de polímeros existen sin un patrón repetitivo de largo alcance. En el arreglo amorfo, las moléculas se encuentran entrelazadas unas con otras. Sin embargo, en algunos polímeros es posible impartir *cristalinidad* a manera de modificar sus características. Las regiones cristalinas en los polímeros se forman cuando las moléculas largas se arreglan de modo ordenado entre ellas. Estas regiones son llamadas *cristalitas* y se pueden promover durante las síntesis del polímero, o por deformación durante su procesamiento subsecuente. Existen polímeros parcialmente cristalinos o semicristalinos, que contiene una fase cristalina y otra amorfa.

Es posible aportar diferentes grados de cristalinidad mediante el control de la rapidez de solidificación durante el enfriamiento y la estructura de la cadena (aunque nunca al 100%). El grado de cristalinidad se ve afectado por la ramificación, es decir que un polímero lineal puede convertirse en un material altamente cristalino, pero no se logran los mismos resultados con un polímero ramificado ya que sus ramas interfieren en la alineación de las cadenas en un arreglo cristalino regular. Un polímero ramificado puede desarrollar un bajo nivel de cristalinidad, pero nunca alcanzará un alto contenido de cristalitas (ver la sección de clasificación de los polímeros según su estructura). (Kalpakjian & Schmid, 2008)

El grado de cristalinidad afecta en gran medida las propiedades mecánicas y físicas de los polímeros. A medida que la cristalinidad aumenta, los polímeros se vuelven más rígidos, más duros, menos dúctiles, más densos, menos flexibles y más resistentes a los solventes y al calor. Al aumento de la densidad con el aumento de la cristalinidad se le llama *contracción por cristalización* y ésta es provocada por un empaquetamiento más eficiente de las moléculas en la red cristalina. Como ejemplo de lo anterior se puede mencionar al polietileno en su forma altamente cristalina, conocido como polietileno de alta densidad, cuya gravedad específica varía entre 0.941 y 0.970 (80-95 % cristalino). El polietileno de baja densidad es de 60 a 70 % cristalino, con una gravedad específica de 0.910 a 0.925. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

El grado de cristalinidad afecta también las propiedades ópticas de los polímeros ya que la reflexión de la luz en los límites entre las regiones cristalina y amorfa provoca opacidad. Asimismo, el índice de refracción es proporcional a la densidad, y cuanto más grande sea la diferencia entre las densidades de las regiones cristalina y amorfa, mayor será la opacidad. Los polímeros que son totalmente amorfos pueden ser transparentes, ejemplos de ello son el policarbonato y los acrílicos. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**c. Temperatura de transición vítrea.** Los polímeros amorfos no tienen un punto de fusión específico, pero sufren un cambio claro en su comportamiento mecánico en un intervalo de temperaturas muy reducido. A bajas temperaturas, los polímeros son duros, rígidos y vítreos; mientras que a altas temperaturas, son gomosos o correosos. La temperatura a la que ocurre dicha transición es llamada *temperatura de transición vítrea*  $T_g$ . El término *vítrea* se utiliza debido a que los vidrios (que son sólidos amorfos) se comportan de la misma manera. A diferencia de los polímeros amorfos, los parcialmente cristalinos tienen un punto de fusión definido  $T_m$ . (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**2. Clasificación de los polímeros.** Los polímeros tienen varias clasificaciones, entre ellas se encuentra la clasificación según su procedencia, estructura, según su composición y según su comportamiento ante el calor. A continuación se describe cada una de las clasificaciones.

**a. Según su procedencia**

***Polímeros naturales.*** Son polímeros que se encuentran en la naturaleza. Algunos de éstos han sido procesados por el hombre durante siglos. Ejemplos de polímeros naturales son el algodón (formado por fibras de celulosa), la seda (poliamida), la lana (proteína del pelo de las ovejas), el látex (suspensión acuosa de partículas de hule), el ADN y ARN, la quitina, entre otros. (Millán, 2003)

***Polímeros sintéticos.*** Son polímeros elaborados por el hombre mediante procesos de polimerización. Los polímeros sintéticos son producidos principalmente a partir de derivados del petróleo. (Millán, 2003)

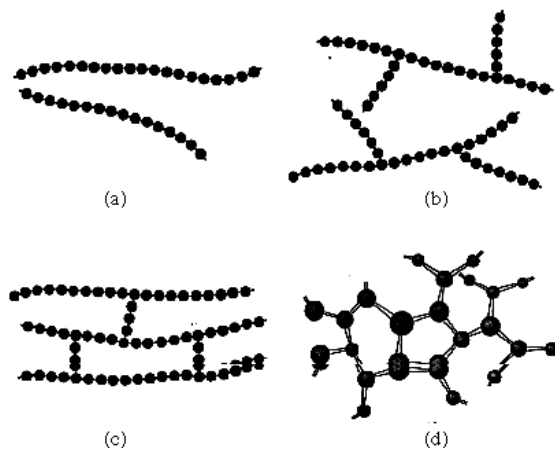
**b. Según su estructura**

***Polímeros lineales.*** Estos son polímeros que poseen una estructura secuencial en la forma de sus cadenas. Las moléculas lineales no necesariamente tienen una forma recta. Algunos ejemplos de polímeros lineales son las poliamidas tal como el nylon 6,6, y el fluoruro de polivinilo. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

***Polímeros ramificados.*** En los polímeros que presentan este tipo de estructura, cadenas de ramas laterales se sujetan a la cadena principal durante la síntesis del polímero. La ramificación interfiere en el movimiento relativo de las cadenas moleculares, por lo que aumenta su resistencia a la deformación y al

agrietamiento por esfuerzo. Su densidad es menor a la de los polímeros lineales, ya que las ramas interfieren en el empaquetamiento eficiente de las cadenas de los polímeros. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Figura 3. Estructuras de los polímeros: a) lineal, b) ramificada, c) enlace cruzado y d) en red.



(Kalpakjian & Schmid, 2008)

**Polímeros de enlace cruzado.** Estos tienen cadenas adyacentes unidas por enlaces covalentes. Algunos ejemplos son los epóxicos, fenólicos y siliconas. El enlace cruzado influye de manera importante en las propiedades de los polímeros y en la vulcanización del hule. Por lo común, esta estructura aporta dureza, resistencia, rigidez, fragilidad y mejor estabilidad dimensional. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**Polímeros en red.** Constan de redes espaciales de tres o más enlaces covalentes activos. A un polímero con muchos enlaces cruzados también se le considera polímero en red. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

### c. Según su composición

**Homopolímeros.** Estos son polímeros cuyas cadenas están formadas por unidades repetitivas del mismo tipo. Sin embargo, es posible combinar dos o tres tipos de monómeros para desarrollar algunas propiedades y características especiales en el polímero. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**Copolímeros.** Los copolímeros contienen dos tipos de unidades repetitivas. Por ejemplo, el estireno-butadieno utilizado ampliamente en llantas de automóviles. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**Terpolímeros.** Los terpolímeros contienen tres tipos de unidades repetitivas. Un ejemplo de estos es el ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno), que es utilizado en cascos protectores, teléfonos y recubrimientos de refrigeradores. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

#### d. Según su respuesta mecánica ante el calor

**Termoplásticos.** Son aquellos que después de fundirse por el efecto del calor, recuperan sus propiedades originales luego de enfriarse. En general, son polímeros lineales y ramificados. (Millán, 2003)

**Termofijos.** Son aquellos que luego del calentamiento se convierten en sólidos más rígidos que los polímeros originales. Esta característica se debe normalmente a una polimerización adicional o de entrecruzamiento. (Millán, 2003)

**3. Propiedades de los polímeros termoplásticos.** Están compuestos de moléculas largas separadas químicamente que se mantienen juntas por enlaces secundarios. La resistencia de los enlaces secundarios determina la resistencia global del polímero, los polímeros lineales y ramificados tienen en general enlaces secundarios débiles. En los termoplásticos, cuando las moléculas se activan y separan por calor, los enlaces secundarios se debilitan y el material se suaviza y por último se funde. El incremento de temperatura debilita los enlaces secundarios mediante vibración térmica de las moléculas largas, de manera que las cadenas adyacentes pueden moverse con mayor facilidad cuando se someten a fuerzas externas de formado. Cuando el polímero termoplástico se enfría regresa a su dureza y resistencia originales. Los termoplásticos no sólo se ven afectados por su estructura, composición y temperatura, sino también por su velocidad de deformación. Algunos ejemplos de termoplásticos son los acrílicos, celulósicos, nailons, polietilenos, el cloruro de polivinilo, etc. (Kalpakjian & Schmid, 2008) (Doyle *et al.*, 1988)

Por debajo de la temperatura de transición vítrea, la mayor parte de los polímeros se comportan como un sólido elástico, es decir que la relación entre esfuerzo y deformación es lineal. Cuando se aumenta el esfuerzo aplicado, finalmente el polímero se fractura, tal como ocurre con un trozo de vidrio a temperatura ambiente. Si elevamos la temperatura de un termoplástico por encima de su temperatura de transición vítrea, primero se hace correoso, con una temperatura mayor, se hace similar al hule. A temperaturas más elevadas se convierte en un fluido viscoso, y su viscosidad se reduce al aumentar su temperatura. A temperaturas aún más elevadas, la respuesta de un termoplástico se asemeja al de un helado. Los termoplásticos se pueden ablandar, moldear en formas, volver a congelar y volver a moldear varias veces. Sin embargo, un calentamiento y enfriamiento repetido causa degradación, es decir, envejecimiento térmico de los plásticos. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Cuando se deforman los termoplásticos por estiramiento, las moléculas de cadena larga tienden a alinearse en la dirección general de la elongación. Este proceso se conoce como *orientación*. El espécimen se hace más fuerte y más rígido en la dirección estirada en comparación con la dirección transversal. El estiramiento es una técnica importante para mejorar la resistencia y la tenacidad de los polímeros, sin embargo, la orientación debilita el polímero en su dirección transversal. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Los termoplásticos están disponibles en muchos grados y variedades, por lo que se debe seleccionar la combinación que se ajuste a sus requerimientos y al costo más bajo. Las propiedades deseadas pueden ser físicas, mecánicas, de servicio o visuales. Algunos materiales tienen cualidades únicas.

Por ejemplo, los celulósicos ofrecen un alto brillo en la superficie; los vinilos fluyen y tienen resistencia al desgaste con extraordinaria flexibilidad. Los polietilenos se usan más que cualquier otro plástico para artículos moldeados debido a sus buenas propiedades físicas y bajo costo. (Doyle *et al*, 1988)

#### **a. Termoplásticos comunes**

**Tereftalato de polietileno (PET).** Es un poliéster formado por policondensación de dos tipos de monómeros: etilenglicol y ácido tereftálico purificado. Consiste en un material ligero con resistencia mecánica a la compresión y caídas, alto grado de transparencia y brillo, actúa como barrera contra los gases, tiene buena resistencia a los aceites minerales, solventes y ácidos pero no a las bases, es inerte y neutral en sabor y además es 100% reciclable. Entre sus diferentes aplicaciones se encuentra la producción de fibra de poliéster, botellas de bebidas carbonatadas y agua, recipientes para otros productos alimenticios, envases para productos no alimenticios (detergentes, productos de limpieza, productos cosméticos, etc.). (Behro, 2007) (Vest, 2003) (UNEP, 2009)

**Polietileno de alta densidad (HDPE).** Este polímero es parte de la familia de las poliolefinas, y usualmente se refiere a polietileno con una densidad mayor a  $940 \text{ kg/m}^3$ , producido en reactores de baja presión. Se caracteriza por tener alta resistencia química, no absorbe humedad, alta resistencia al impacto, alta resistencia mecánica, rigidez y dureza, bajo brillo, inodoro e insípido. Su color natural es blanco lechoso y opaco. Sus principales aplicaciones son: recipientes para leche y jugos, recipientes para medicamentos, cosméticos, productos de limpieza y de cuidado personal, envases para lubricantes y aceite de motor, tubería, bolsas plásticas de alta resistencia, aislamiento para cables y juguetes. (Garzón *et al*, s.f.) (PlasticsEurope, 2008)

**Polietileno de baja densidad (LDPE).** También pertenece a las poliolefinas. Es suave, flexible y fácil de cortar, transparente cuando se encuentra en capas muy delgadas y blanco lechoso cuando posee un alto calibre, posee alta tenacidad, resistencia al impacto, resistencia química y baja permeabilidad al agua. Es utilizado en la manufactura de láminas o películas para bolsas y empaques de alimentos, tapones y cierres, tubos flexibles y mangueras, juguetes y recubrimientos para cables telefónicos. (Garzón *et al*, s.f.) (UNEP, 2009)

**Cloruro de polivinilo (PVC).** Es un material rígido y duro, a menos que se agreguen plastificantes. Es quebradizo a bajas temperaturas, tiene buenas propiedades eléctricas para la aplicación de voltaje y frecuencia bajas, es transparente y más denso que el agua. Las aplicaciones más comunes del PVC incluyen botellas, láminas finas, blisters, materiales de empaque transparente, tubería, accesorios de tubería, marcos de ventanas, etc. Si se añaden plastificantes, el producto se conoce como cloruro de polivinilo plastificado (PPVC), el cual es blando, flexible y débil. El PPVC se utiliza para fabricar artículos inflables como balones de fútbol, mangueras, revestimientos de cable, etc. (UNEP, 2009)

**Polipropileno (PP).** Es más rígido que el PE, es posible doblarlo bruscamente sin romperlo, posee buena resistencia eléctrica, baja permeabilidad al agua, resistente al ataque químico. Su tonalidad natural va desde ligeramente transparente hasta opaca, es inodoro e insípido, es idóneo para muchos usos del sector alimenticio y farmacéutico. Se utiliza para sillas de alta calidad, molduras fuertes como cajas de batería y otras partes de automóviles, cajas, artículos domésticos como vasos, plastos hieleras y contenedores de alimentos, tubería, instrumentos quirúrgicos, biberones, juguetes, fibras textiles, jeringas desechables, etc. (Garzón *et al.*, s.f.) (UNEP, 2009)

**Poliestireno (PS).** En su forma sin procesar, el poliestireno es quebradizo y transparente. A menudo se mezcla con otros materiales (copolimerizado) para obtener las propiedades deseadas. El poliestireno rígido se caracteriza por tener una superficie brillante, resistencia química limitada a los productos orgánicos y poca absorción de agua. El poliestireno se utiliza para utensilios de cocina transparentes y de bajo costo, recipientes para alimentos, juguetes, etc. (Garzón *et al.*, s.f.) (UNEP, 2009)

*Tabla 1. Propiedades de termoplásticos comunes.*

<b>Polímero</b>	<b>Gravedad específica</b>	<b>Temperatura de fusión (°C)</b>
PET	1.35-1.40	240-260
HDPE	0.96	130
LDPE	0.92	110
PVC	1.35-1.40	70-90
PP	0.91	160-170
PS	1.04-1.07	80-95

(ACOR, 2003) (Tall, 2000)

**4. Propiedades de los plásticos termofijos o termoestables.** Cuando las moléculas de cadena larga de un polímero se encuentran entrelazadas tridimensionalmente, la estructura se convierte en una molécula de gran tamaño con fuertes enlaces covalentes, polímeros que se conocen como termofijos o termoestables. La reacción de entrelazamiento o de *curado* durante la polimerización de los termoestables es irreversible. El comportamiento de un plástico termoestable a elevadas temperaturas se asemeja a lo que ocurre al hervir un huevo, una vez que el huevo está hervido y enfriado, su recalentamiento no cambiará su forma. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

El proceso de polimerización de los termoestables generalmente ocurre en dos etapas. En la primera las moléculas son parcialmente polimerizadas en cadenas lineales. En la segunda se completa el entrelazamiento bajo calor y presión durante el moldeo y formado de la pieza. Los polímeros termofijos no poseen una temperatura de transición vítrea definida. Debido a la naturaleza de los enlaces, la resistencia y dureza, éstos no se ven afectados por la temperatura ni por la velocidad de deformación. Si se aumenta suficientemente la temperatura, estos polímeros comenzarán a quemarse, degradarse y carbonizarse. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Los plásticos termoestables poseen mejores propiedades mecánicas, térmicas y químicas, resistencia eléctrica y estabilidad dimensional, respecto a los termoplásticos. Las perillas de las cacerolas, así como componentes de interruptores de luz, son comúnmente fabricados a partir de plásticos termoestables. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**5. Aditivos en los plásticos.** Por lo general, los polímeros se combinan con aditivos para impartir ciertas propiedades específicas. Estos aditivos modifican y mejoran ciertas características del polímero, tal como: rigidez, resistencia, color, flamabilidad, facilidad de procesamiento, etc. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**a. Plastificantes.** Se agregan a los polímeros para impartir flexibilidad y suavidad mediante la reducción de su temperatura de transición vítrea. Los plastificantes son solventes de bajo peso molecular con elevados puntos de ebullición. Estos reducen la resistencia de los enlaces secundarios entre las moléculas de cadena larga, haciendo al polímero blando y flexible. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**b. Antioxidantes y aditivos de protección contra la radiación ultravioleta.** La mayor parte de los polímeros son afectados por la radiación ultravioleta y por el oxígeno, ya que debilitan y rompen los enlaces primarios, haciendo que el polímero se vuelva rígido y frágil. Para proteger de la radiación ultravioleta, los polímeros se combinan con hollín o negro de carbón, ya que éste absorbe un gran porcentaje de la radiación. Para proteger los polímeros de la oxidación se le añaden antioxidantes. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**c. Rellenos.** Los rellenos utilizados generalmente son: aserrín fino, polvo fino de sílice, arcilla, talco, carbonato de calcio y fibras cortas de celulosa. Debido al bajo costo de los rellenos, éstos pueden ser utilizados para reducir el costo general de los polímeros. Dependiendo del tipo de relleno, pueden mejorar la resistencia, dureza, tenacidad, resistencia a la abrasión, estabilidad dimensional o rigidez de los plásticos. La efectividad de un relleno depende de la naturaleza del enlace del material de relleno y de las cadenas del polímero. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**d. Colorantes.** Existen orgánicos (tintes) o inorgánicos (pigmentos). La selección de un colorante depende de la temperatura de servicio y de la cantidad esperada de exposición a la luz. Los pigmentos son partículas dispersas y por lo general tienen más resistencia que los tintes a la temperatura y a la luz. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

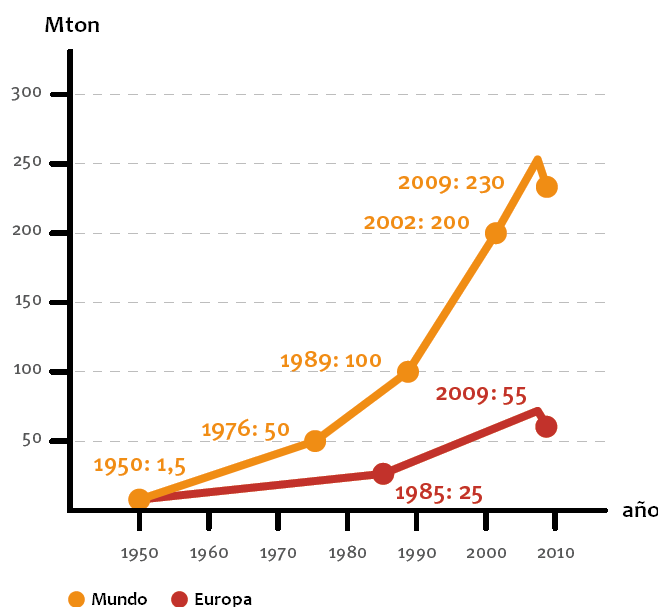
**e. Retardantes de flama.** Si las temperaturas son lo suficientemente altas, los polímeros se queman. La flamabilidad de los polímeros varía considerablemente dependiendo de su composición, especialmente del contenido de cloro y flúor. La flamabilidad de los polímeros se puede retardar al utilizar materias primas menos inflamables o retardantes de flama como ciertos compuestos de cloro, bromo y fósforo. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

**f. Lubricantes.** Estos pueden agregarse a los polímeros para reducir la fricción durante su procesamiento en productos útiles y evitar que las piezas formadas de plástico se adhieran a los moldes. Los lubricantes comunes son: aceite de linaza, aceite mineral, ceras naturales y sintéticas, jabones metálicos como el estearato de calcio y estearato de zinc. La lubricación también ayuda a que las películas delgadas de polímero no se peguen entre sí. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

## B. Producción y demanda de los plásticos a nivel internacional

Los plásticos son una historia de éxito global. La industria ha crecido continuamente por aproximadamente 50 años. La producción aumentó de 1.5 millones de toneladas en 1950 a 230 millones de toneladas en el año 2009 (Figura 4). Este crecimiento ha sido alrededor de 9% al año en promedio. A largo plazo, se espera que la historia exitosa de los plásticos continúe, ya que estos materiales aún se encuentran lejos de haber aprovechado todo el potencial de sustitución. (EuPC *et al*, 2010)

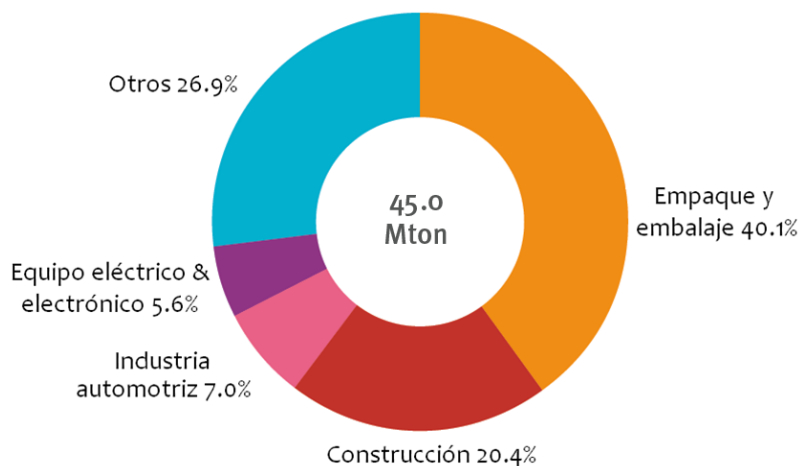
Figura 4. Producción mundial de plásticos (1950-2009).



(EuPC *et al*, 2010)

La demanda de resinas plásticas por transformadores europeos cayó un 7.2% del año 2008 a 45 millones de toneladas en el 2009. El mercado de las aplicaciones de resinas plásticas permaneció constante, siendo el segmento de empaque y embalaje el más grande con un 40.1% de la demanda total. El segmento siguiente es el de la construcción, que presenta un 20.4% de la demanda. El segmento de aplicaciones automotrices constituye el 7%, para la manufactura de equipo eléctrico y electrónico se destinó 5.6%, y otras aplicaciones utilizaron el 26.9% de la demanda total de plástico en Europa (ver Figura 5). El segmento de otros involucra diferentes segmentos de aplicación pequeños tal como el de deportes, agricultura, maquinaria de ingeniería, aplicaciones médicas, etc. (EuPC *et al*, 2010)

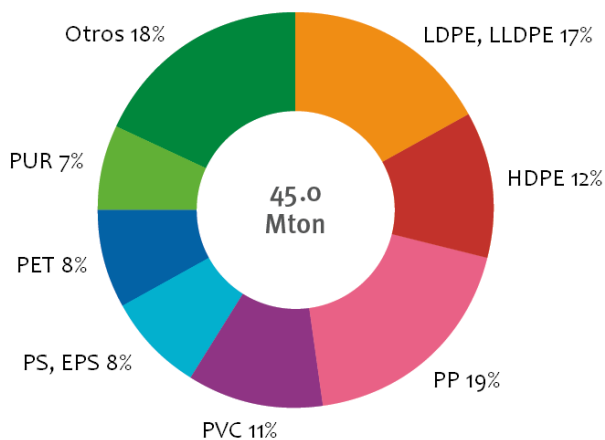
Figura 5. Demanda de plásticos en Europa por segmentos de aplicación en el año 2009.



(EuPC *et al*, 2010)

Existen alrededor de 20 distintos grupos de plásticos, cada uno con diferentes grados disponibles para cumplir con propiedades específicas para cada diferente aplicación. Sin embargo, hay 5 familias de polímeros termoplásticos con el mayor volumen de uso, entre las cuales se encuentra el polietileno incluyendo el LDPE, LLDPE y HDPE. También se encuentra el PP, PVC, PET y PS (incluyendo el rígido y expandido). Juntos, éstas 5 familias representan el 75% de la demanda total en Europa, tal como se observa en la Figura 6. (EuPC *et al*, 2010)

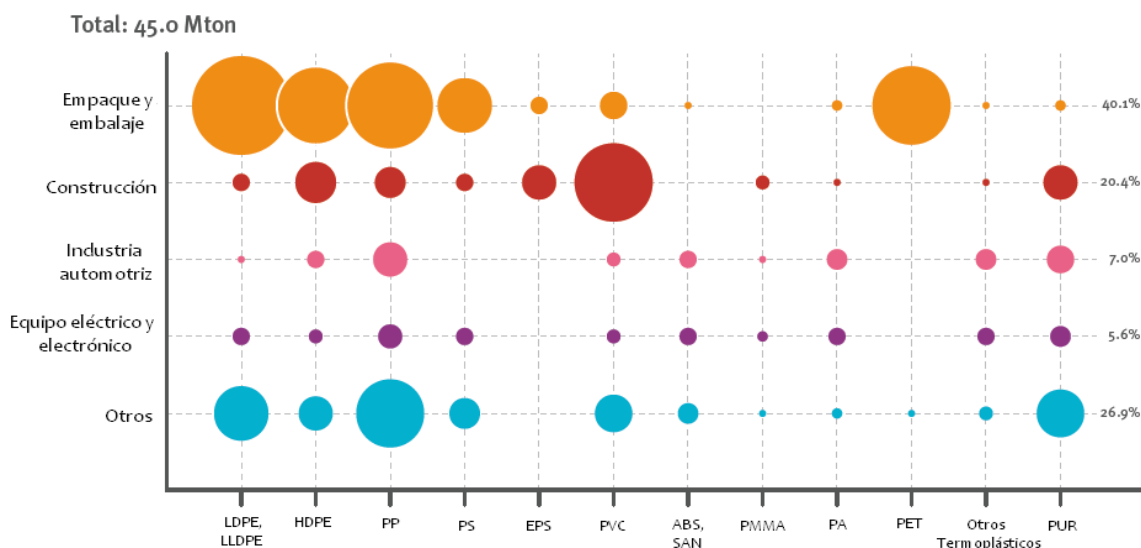
Figura 6. Demanda de plásticos en Europa por tipo de resina (2009).



(EuPC *et al*, 2010)

En la Figura 7, se puede observar no sólo la distribución de la demanda en Europa respecto al segmento de aplicación, sino también la distribución de tipo de resina utilizada en cada segmento. Por ejemplo, en la industria de empaque y embalaje, los plásticos más utilizados son las poliolefinas (HDPE, LLDPE, LDPE, PP) y el PET. (EuPC *et al*, 2010)

Figura 7. Demanda de plásticos por segmentos de aplicación y por resina en Europa durante el año 2009.



(EuPC *et al*, 2010)

### C. Problemática actual respecto al consumo y desecho masivo de plásticos

En la actualidad, los artículos de “usar y tirar” (es decir, de vida útil corta) como los envoltorios desmesurados han invadido el mercado, lo cual se ha convertido en un problema en los desagües debido a que se obstruyen con desechos no biodegradables. Asimismo, su disposición irresponsable en el ambiente produce contaminación visual. Los plásticos representan un gran porcentaje de volumen en la basura. Respecto a sus características de peligrosidad, la mayor parte de plásticos sintéticos no representa un riesgo para el ambiente; sin embargo, representan un problema mayor debido a que éstos no pueden ser degradados por el entorno. Los plásticos no se oxidan ni se descomponen con el tiempo, y se estima que una botella de plástico perdura alrededor de 200 años. Además, los vertederos no serán capaces de acoger la magnitud de este material por mucho tiempo, lo cual representa un problema ambiental de dimensiones considerables. (CGP+L, 2004)

El abandono de los envases plásticos en diversos lugares de la vía pública así como en vertederos de cielo abierto, contribuye a incrementar varios tipos de contaminaciones, entre éstas las químicas y patogénicas. Los envases o recipientes pueden contener restos de alimentos que se pudren y proveen medios apropiados para la proliferación de bacterias, insectos y roedores que producen enfermedades. (CGP+L, 2004)

Debido a que los plásticos son altamente combustibles, el depósito de grandes cantidades en rellenos sanitarios y vertederos representa peligro de incendios con emanaciones de dioxinas y otras sustancias de alto riesgo para la salud. Algunos contaminantes como metales pesados pueden provenir de los aditivos utilizados en la manufactura de los productos plásticos, algunos pigmentos utilizados tienen metales como cromo y plomo por ser más baratos. Los aditivos liberados como productos de la

incineración o por deterioro natural pueden representar un problema si hay grandes cantidades juntas. Los productos de la incineración incompleta de los plásticos también representan un problema. (CGP+L, 2004)

El PVC se considera la principal fuente de cloro para la formación de dioxinas y furanos clorados durante la incineración de desechos sólidos. Algunos estudios consideran que el PVC genera ácido clorhídrico, dióxido de carbono, agua y hollín. Otro problema es la quema de productos plásticos en rellenos sanitarios o vertederos en donde haya generación de metano, ya que esto puede incrementar los incendios incontrolados generados por las emanaciones de metano. (CGP+L, 2004)

A esta problemática se deben añadir los costos de transporte, ya que a pesar de que los plásticos son bastante livianos, poseen un volumen elevado. Por lo que para disminuir dichos costos es necesario compactarlos. (CGP+L, 2004)

Es importante mencionar que, al final de su ciclo de vida, los plásticos aún tienen mucho que ofrecer y, por este motivo, son demasiado valiosos para ser desperdiciados, por lo que tienen diferentes opciones de recuperación disponibles para aprovechar al máximo todo su valor. Cuando los productos plásticos dejan de servir, es necesario recuperar el valor que se ha invertido en su proceso de elaboración. De esta manera, no sólo es posible obtener un beneficio económico sino además se provee una solución a la problemática ambiental. (PlasticEurope, 2009)

#### **D. Desechos plásticos en Guatemala**

De acuerdo a las estadísticas ambientales presentadas en el Instituto Nacional de Estadística, el total de desechos sólidos generados en el país durante el año 2009 fue de 1,746,059 toneladas. A continuación se presenta la distribución del total de desechos por departamento (Tabla 2). (INE, 2010)

*Tabla 2. Desechos sólidos domiciliarios generados en los departamentos de Guatemala durante el año 2009.*

<b>Departamento</b>	<b>Población total</b>	<b>Desechos totales (ton)</b>
Guatemala	3,049,601	445,242
El Progreso	153,261	19,020
Sacatepéquez	303,459	18,830
Chimaltenango	578,976	80,304
Escuintla	670,570	93,008
Santa Rosa	334,720	41,539
Sololá	411,202	46,528
Totonicapán	447,651	62,089
Quetzaltenango	754,457	85,367
Suchitepequez	492,481	68,307
Retalhuleu	290,796	40,333
San Marcos	972,781	134,925
Huehuetenango	1,085,357	95,077
Quiché	890,764	113,795
Baja Verapaz	257,876	29,179
Alta Verapaz	1,046,185	118,376

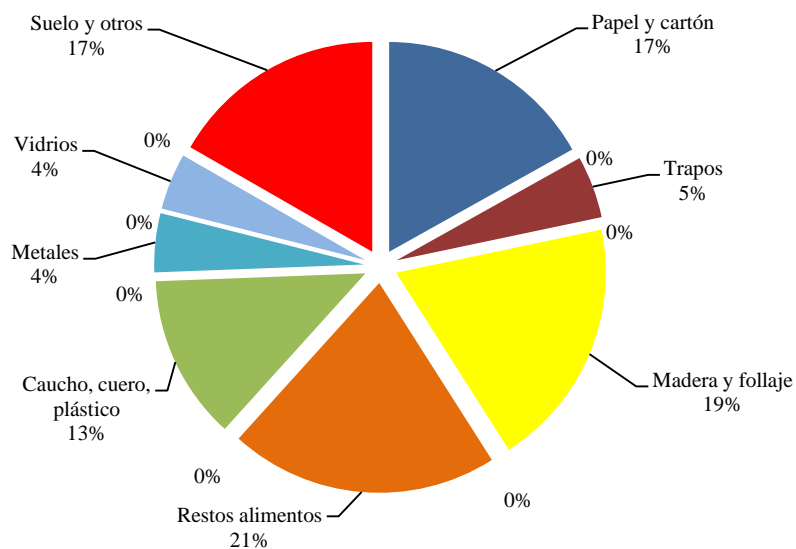
Continuación tabla 2.

Departamento	Población total	Desechos totales (ton)
Petén	588,860	32,240
Izabal	393,345	50,250
Zacapa	215,752	29,925
Chiquimula	355,223	49,269
Jalapa	301,755	38,549
Jutiapa	421,984	53,908
<b>Total (República)</b>	<b>14,017,057</b>	<b>1,746,059</b>

(INE, 2010)

En la Figura 8 se observa la composición de los residuos totales indicados en la Tabla 2. De acuerdo a la Figura 8, el 13% del total de desechos está compuesto por plásticos, caucho y cuero. No se encuentra disponible el porcentaje exacto de plásticos en los residuos sólidos en Guatemala. Sin embargo, según el “*Estudio de factibilidad del uso de instrumentos económicos para el manejo apropiado de desechos de alto impacto ambiental en Guatemala*” elaborado por CCAD-PROSIGA en el año 2003, los residuos plásticos suponen un 20% en volumen y un 8% en peso de los residuos sólidos urbanos. (CGP+L, 2004) (INE, 2010)

Figura 8. Composición de la basura domiciliar generada en Guatemala durante el año 2009.



(INE, 2010)








## E. Reciclaje de plásticos

La palabra *reciclar* se define como el conjunto de operaciones de recogida y tratamiento de residuos que permiten reintroducirlos en un ciclo de vida. Respecto al reciclaje de residuos plásticos, en

1988 la Sociedad de la Industria del Plástico (SPI por sus siglas en inglés) desarrolló un código de identificación de resinas para facilitar el reciclaje de plástico post-consumo. La SPI proporcionó a los fabricantes un sistema coherente y uniforme para identificar la resina contenida en botellas plásticas y contenedores. La codificación SPI, mediante la cual un número se registra en el elemento de plástico para especificar el tipo de polímero que se utilizó en su proceso de fabricación, se centró en el plástico de empaque o envasado que comúnmente se encuentra en el flujo de residuos domiciliarios. La mayoría de estos plásticos son fabricados de 6 tipos de polímeros termoplásticos: PET, HDPE, PVC, LDPE, PP y PS. (UNEP, 2009) (JSPV, 2010)

## 1. Sistema de identificación de polímeros industriales SPI

*Tabla 3. Sistema internacional de identificación de resinas.*

Tipo de resina	Abreviatura	Código	Símbolo
Tereftalato de polietileno	PET/PETE	1/01	
Polietileno de alta densidad	HDPE/PEAD	2/02	
Cloruro de polivinilo	PVC/V	3/03	
Polietileno de baja densidad	LDPE/PEBD	4/04	
Polipropileno	PP	5/05	
Poliestireno	PS	6/06	
Otros	OTHER/OTROS	7/07	

**2. Opciones de recuperación de desechos plásticos.** En algún momento, todos los productos alcanzan el final de su vida útil, y es entonces cuando resulta necesario gestionar el final de su ciclo de vida. En esta etapa, existen tres opciones de recuperación bastante diferentes para los productos elaborados con plásticos. (PlasticsEurope, 2009)

**a. Reciclaje mecánico.** Consiste en un proceso físico mediante el cual el plástico post-consumo o industrial es recuperado permitiendo su posterior utilización. Este proceso consiste en la clasificación y trituración de plásticos para convertirlos directamente en gránulos o en reciclados procesables. La estructura química de los polímeros permanece casi inalterada, y las diminutas piezas trituradas de plástico se limpian y se clasifican en diferentes niveles. El reciclado mecánico tiene sentido cuando el plástico recuperado está limpio y es de un único tipo. Grandes cantidades de material de buena calidad, que no ha sufrido ningún tipo de degradación durante su uso, y que puede recogerse utilizando sistemas organizados adecuadamente, pueden ser utilizados para garantizar que el reciclado mecánico sea una opción viable. Desde el punto de vista técnico, las plantas de reciclaje mecánico requieren inversiones moderadas en comparación a las de reciclaje químico. Además, el proceso del reciclaje mecánico no conlleva alta contaminación al ambiente, siempre que los efluentes líquidos sean tratados. (PlasticsEurope, 2009) (Behro, 2007)

**b. Reciclaje químico.** Es la descomposición de plásticos en sus componentes químicos, utilizando para ello calor o una reacción química. Los elementos producidos son, en su mayoría, aceites o gases, que pueden utilizarse posteriormente para producir nuevos plásticos u otras materias primas. El reciclado de materias primas es ideal cuando se mezcla una gran cantidad de plásticos diferentes o cuando el material está en contacto con otras sustancias. Existen varias tecnologías disponibles para el reciclado de materias primas, entre las cuales se incluye la pirólisis, la gasificación, la despolimerización, los altos hornos o los hornos de fundición. (PlasticsEurope, 2009)

Aunque ha sido demostrada la viabilidad técnica de estos procesos, las situaciones del mercado actual hacen que la tecnología de altos hornos tan solo sea viable a nivel industrial. Una de las ventajas de esta opción es que los productos obtenidos del reciclaje químico son de muy buena calidad. (PlasticsEurope, 2009)

**c. Recuperación energética.** La recuperación energética consiste en quemar los residuos plásticos para aprovechar la energía que éstos contienen. La intención de la combustión de residuos plásticos es utilizar la energía que se obtiene para generar vapor, electricidad o para obtener vapor en procesos industriales. La recuperación energética es especialmente apropiada para fracciones de residuos plásticos en contacto o mezclados con diversas sustancias. (PlasticsEurope, 2009)

El gran poder calorífico de los plásticos es equivalente al de los carburantes, esto se debe a que los plásticos se producen a base del petróleo. Por esta razón, los plásticos pueden sustituir en parte a los carburantes como materia prima esencial, ofreciendo a la vez una opción para conservar los recursos más importantes. En general, esta opción es la mejor cuando el reciclaje de materiales plásticos no es viable técnica o económicamente. (PlasticsEurope, 2009)

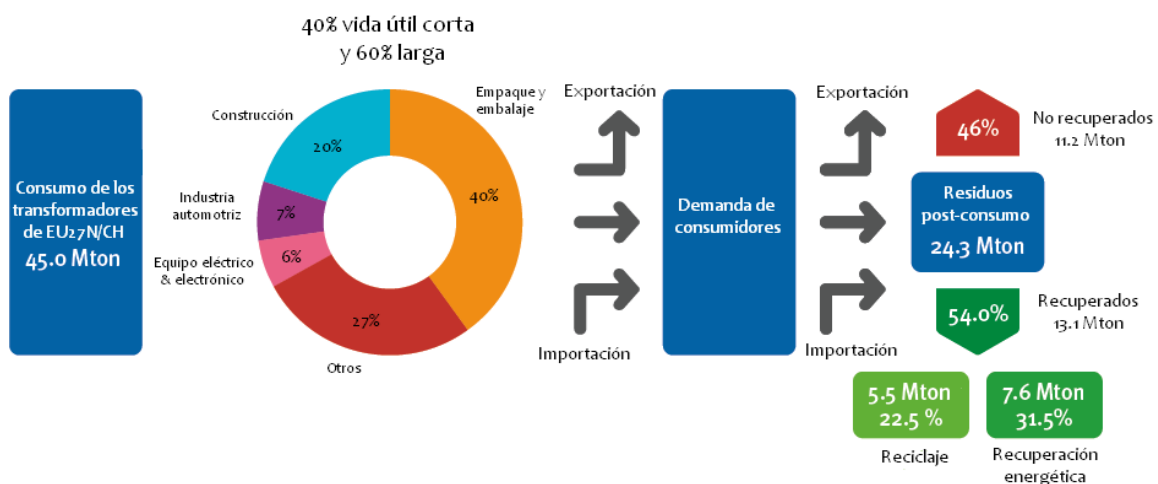
Según estudios recientes, existen importantes sinergias positivas resultantes de la co-combustión de combustibles sólidos recuperados (CSR) y biomasa. La adición de CSR permite una combustión más rápida, esto debido en parte a que la biomasa tiene un cierto contenido de agua, mientras que los CSR no.

Esto posibilita una incineración más rápida y eficiente, mejor estabilidad de combustión y mejores resultados en las calderas. La combustión conjunta de CSR con biomasa resulta rentable económicamente cuando el CSR se encuentre localmente. (EuPC *et al*, 2008)

En la incineración se debe tener cuidado especial con los residuos de PVC ya que por ser un compuesto clorado, al quemarlos se generan dioxinas altamente cancerígenas. Sin embargo, estos contaminantes se pueden eliminar con filtros especiales. (CGP+L, 2004)

**3. Situación del reciclaje a nivel internacional.** En la Figura 9, se muestra la cadena de valor de los plásticos en la cual se incluye el destino final de los desechos plásticos post-consumo en Europa durante el año 2009. En esta figura, se observa que el 46% del total de desechos plásticos en Europa no se aprovecha mediante procesos de reciclaje o recuperación de energía. Además, del porcentaje de residuos plásticos aprovechados, la mayor cantidad se destina al proceso de incineración para recuperación de energía, mientras que un porcentaje menor es el que se recicla. (EuPC *et al*, 2010)

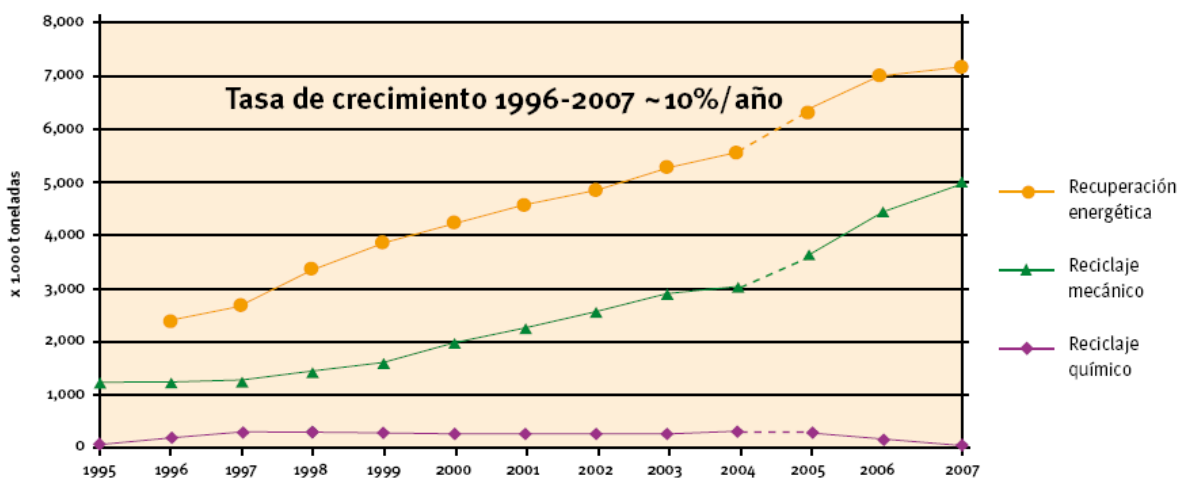
Figura 9. Cadena de valor de los plásticos durante su ciclo de vida en Europa durante el año 2009.



(EuPC *et al*, 2010)

A continuación se muestra la tendencia de reciclaje y recuperación energética en Europa durante los años 1995 a 2007 (Figura 10). (EuPC *et al*, 2007)

Figura 10. Crecimiento continuado de reciclaje y recuperación energética en Europa durante 1995-2007.



(EuPC *et al.*, 2007)

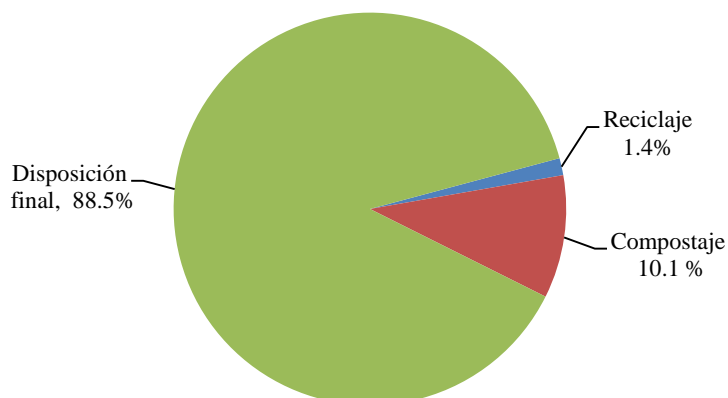
**4. Situación del reciclaje en Guatemala.** De acuerdo al “*Reporte nacional de manejo de residuos en Guatemala*” elaborado por el Centro de Producción más Limpia en el año 2004, es difícil estimar la capacidad real del país para el reciclaje, ya que existe una gran cantidad de pequeños recicladores que trabajan en el mercado informal en forma poco controlada. Los pequeños recolectores y productores no se encuentran inscritos en el registro mercantil y muchas veces trabajan en condiciones inadecuadas y dañinas para los trabajadores. Asimismo, por políticas internas de confidencialidad y de protección de mercado, existe cierta desconfianza al proporcionar datos de capacidades por parte de empresas recicladoras. (CGP+L, 2004)

En el reporte mencionado también se indica que en general, los residuos plásticos son acopiados directamente en las plantas, vertederos clandestinos y vertederos controlados. Los residuos plásticos son enviados a plantas procesadoras en donde son lavados, molidos y a veces peletizados para su posterior uso en las fábricas de plástico. Esta actividad está a cargo de pequeños recolectores, en muchos casos sin empresas formales reconocidas. Respecto al vertedero municipal de la zona 3 capitalina, existen los llamados “guajeros”, quienes se dedican al acopio y pasan los productos clasificados a intermediarios que hacen la venta directa a las fábricas recicladoras. (CGP+L, 2004)

Según datos del 2004 (fecha de elaboración del *reporte nacional de manejo de residuos en Guatemala*), los plásticos son acopiados igualmente por recicladoras, en donde los precios oscilan desde Q.10.00 por quintal para envases de gaseosa o agua pura, Q.40.00 por quintal para envases de jugo y leche (sin etiqueta ni jugo ni tapón) y Q.90.00 el quintal de tapón. (CGP+L, 2004)

La única información encontrada sobre el reciclaje en Guatemala se muestra en la Figura 11, datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística (INE). Sin embargo el porcentaje de reciclaje mostrado involucra varios materiales y no se sabe con certeza qué porcentaje del total le pertenece específicamente al plástico. Cabe notar además, que la información de la Figura 11 corresponde al destino final de un solo relleno sanitario del departamento de Guatemala.

Figura 11. Destino de los residuos y desechos sólidos que ingresaron al relleno sanitario de Bárcenas, Villa Nueva en el año 2009.



(INE, 2010)

## F. Proceso y tecnología del reciclaje mecánico de plásticos

El proceso de reciclaje mecánico es básicamente el mismo para los distintos plásticos. Los pasos principales en el proceso de reciclaje mecánico son: recolección, clasificación, molienda, lavado, secado, extrusión, peletizado (opcional) y manufactura de productos finales. El orden de los pasos anteriores no es estricto, ya que varía dependiendo del diseño del proceso. A continuación se describe cada una de las etapas básicas mencionadas en el proceso de reciclaje. (Wansbrough & Yuen, s.f.) (Berho, 2007)

**1. Recolección de plásticos.** Este es el proceso en el que los materiales reciclables son recuperados de diferentes fuentes y enviados a instalaciones de procesamiento. Los plásticos para reciclaje pueden provenir de dos fuentes: post-consumo y post-industriales. Los plásticos post-consumo son aquellos que ya han sido utilizados por las personas. Los plásticos post-industriales son productos o piezas plásticas resultantes de procesos de fabricación que son rechazados por la industria debido a que no cumplen con los requerimientos de calidad. Los plásticos post-consumo pueden recolectarse en contenedores o bolsas especiales de reciclaje, se pueden realizar recolecciones domésticas o recuperación de plásticos en vertederos en donde se deben separar de otros residuos sólidos urbanos como papel, cartón, vidrio, aluminio, metales, piedras, etc. (Wansbrough & Yuen, 2008) (EPIC, s.f.)

**2. Clasificación.** En el reciclaje mecánico este paso es el más importante y crítico durante el proceso para obtener las características deseadas en los productos finales. Sin embargo, la separación constituye una dificultosa actividad debido a que la materia prima se encuentra mezclada con otros materiales sin interés. Para reciclar plásticos post-consumo, se deben eliminar contaminantes tales como restos de papel, aluminio, metales, piedras, suciedad, etc., que son el resultado de malas prácticas en el sistema de recolección. Además, deben ser separados por tipo de polímero, ya que la presencia de otros

polímeros que no son los de interés también representa contaminación y estas impurezas determinan la calidad del producto final; esto debido a las incompatibilidades (termodinámica y en la aplicación) entre los diferentes polímeros. A la etapa en que los plásticos son separados según su tipo se le llama *clasificación*. Los polímeros separados por tipo de resina, por ser más puros, tienen un valor mayor y son preferidos por los recuperadores o plantas de procesamiento ya que la complejidad del proceso de reciclaje depende del grado de contaminación de la materia prima. En muchos casos, los plásticos también son clasificados por color con el objetivo de mejorar la apariencia física de los productos derivados de material reciclado. (Tall, 2000) (Barcala *et al.*, s.f.) (VERC, 2005) (Brandrup, 1996)

La industria ha buscado sistemas que solucionen el problema de la clasificación, de manera que en la actualidad existen varias técnicas o métodos opcionales para desempeñar esta etapa en el proceso de reciclaje. Las opciones y tecnologías de clasificación se describen a continuación, y éstas pueden ser combinadas para lograr mejores resultados durante el proceso. Algunas de estas alternativas se aplican a recipientes plásticos enteros (macroclasificación) y otras a piezas de plástico triturado (microclasificación). (Barcala *et al.*, s.f.) (Bruno, s.f.)

**a. Clasificación manual.** La clasificación manual consiste en la identificación de diferentes materiales por un grupo de personas entrenadas mientras que éstos pasan a través de una cinta transportadora. Los materiales son identificados de acuerdo al sistema de codificación SPI y según las diferentes características de los plásticos que los distingue visualmente. La técnica de clasificación manual puede ser utilizada cuando los componentes plásticos son lo suficientemente grandes para justificar el tiempo y esfuerzo requerido, ya que por ser una labor intensiva, es costosa y usualmente implica malas condiciones de trabajo para las personas que llevan a cabo la clasificación. Además, debe ser tomada en cuenta la posibilidad de errores humanos; por lo tanto, los materiales clasificados son utilizados para aplicaciones de bajo valor. (Tall, 2000) (VERC, 2005)

**b. Clasificación por densidad.** Este es el método más comúnmente utilizado para separar ciertos tipos de plástico debido a su costo relativamente bajo. Esta clasificación se lleva a cabo durante el procesamiento de los plásticos mediante flotación y hundimiento en los procesos de lavado de material triturado. La separación se realiza utilizando un medio acuoso de densidad conocida, y la técnica se basa en la diferencia de densidades de los polímeros reciclables (Tabla 1). La mezcla de polímeros es colocada en un tanque que contiene el medio acuoso, los polímeros que presentan densidades mayores a la del fluido utilizado se hunden, mientras que los polímeros con densidades menores flotan. Esto último significa que la densidad del medio acuoso debe tener un valor intermedio respecto a las densidades de los polímeros a separar. (ACOR, 2003) (Pascoe, 2000)

El agua es el medio más común para la clasificación de plásticos por densidad, ya que permite la separación de poliolefinas (HDPE, LDPE, PP) y no poliolefinas (PET, PVC, PS). En agua (gravedad específica de 1.00) las poliolefinas flotan, mientras que las no poliolefinas se hunden, lo cual se puede corroborar al observar las densidades de estos materiales en la Tabla 1. Es posible añadir una mínima

cantidad de detergente al agua antes de realizar la separación para disminuir el efecto de la tensión superficial y lograr una separación más eficiente. (ACOR, 2003) (Pascoe, 2000)

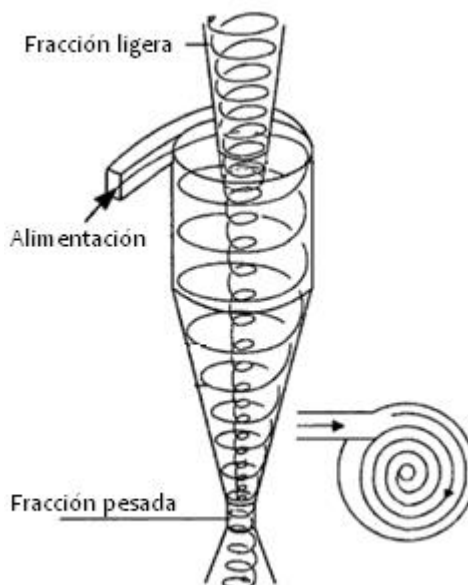
Para la separación de polímeros con densidades menores a la del agua es común utilizar como medio acuoso mezclas de agua con etanol o metanol. Mientras que para densidades mayores suele utilizarse soluciones de NaCl, ZnCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub> y de otras sales. (VERC, 2005)

Algunos problemas que se pueden presentar con este método es que la separación puede ser lenta, difícil de controlar y se puede obtener productos de baja pureza si las diferencias de densidad de los plásticos a separar son bajas. Para lograr una buena separación se requiere de largos tiempos de retención, permitiendo que las piezas de polímero se estabilicen. Debido a que este método utiliza la gravedad para lograr la separación, es esencial que el tamaño de las partículas de plástico a separar sea aproximadamente igual en toda la mezcla. Otro problema es que la densidad de las soluciones acuosas puede ser difícil de controlar debido a variaciones en la temperatura del ambiente y a la evaporación de soluciones binarias que provoca cambios en la composición y por lo tanto en la densidad. (VERC, 2005)

Desarrollos recientes en separación centrífuga han mejorado la eficiencia de este proceso. Actualmente las separaciones por densidad también se pueden llevar a cabo en hidrociclones o centrífugas. Un hidrociclón es un separador centrífugo continuo que separa el material en un medio acuoso de acuerdo a su densidad. Estos separadores líquidos no contienen partes móviles y tienen bajos requerimientos de mantenimiento. Utilizan el principio de la aceleración centrífuga para separar mezclas de polímeros en una fracción pesada y una ligera de acuerdo a su gravedad específica. Un típico hidrociclón consiste en un recipiente en forma de cono, tal como se muestra en la Figura 12. La magnitud de la fuerza centrífuga (100-2000 veces la aceleración de la gravedad) genera alta velocidad de sedimentación y asegura una rápida y alta precisión de separación. (Pascoe, 2000) (VERC, 2005)

Un proceso similar al del hidrociclón se logra con el uso de una centrífuga cilíndrica llena de agua, la diferencia es que ésta última opera a una fuerza mayor. Esta técnica puede separar selectivamente, lavar y deshidratar piezas plásticas de una mezcla de polímeros y además alcanza una eficiencia de más de 99.5% de pureza. La separación es rápida y se caracteriza por una alta selectividad debido a la alta velocidad de rotación (produciendo un campo centrífugo 1000-1500 veces más alta que la aceleración de la gravedad). El tiempo de residencia promedio de las partículas en el equipo es de aproximadamente sólo 25 s. El medio acuoso dentro de la centrífuga puede cambiar dependiendo de la densidad requerida para el tipo de polímeros a separar. La separación mediante este método no depende del tamaño y geometría de las partículas plásticas. La desventaja de las separaciones centrífugas respecto al uso de un simple tanque es la mayor inversión en el equipo (hidrociclones y centrífugas). (VERC, 2005)

Figura 12. Esquema de un hidrociclón utilizado para separación de plásticos por densidad.



(Pascoe, 2000)

**Fluidos supercríticos y cercanamente supercríticos como medio de separación.** El uso de estos fluidos, tal como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), como medio de separación por densidad ha sido sugerido en varios estudios. Entre las ventajas de dichos fluidos se puede mencionar que poseen una densidad variable que se puede controlar mediante la variación de la presión en la región del punto crítico. Además, poseen baja viscosidad lo cual mejora la eficiencia de separación, baja solubilidad con los termoplásticos y altas presiones de vapor a condiciones ambiente por lo que se obtiene un producto seco de dicho proceso. Sin embargo esta operación involucra altos costos debido a que se necesita un reactor presurizado. (Pascoe, 2000)

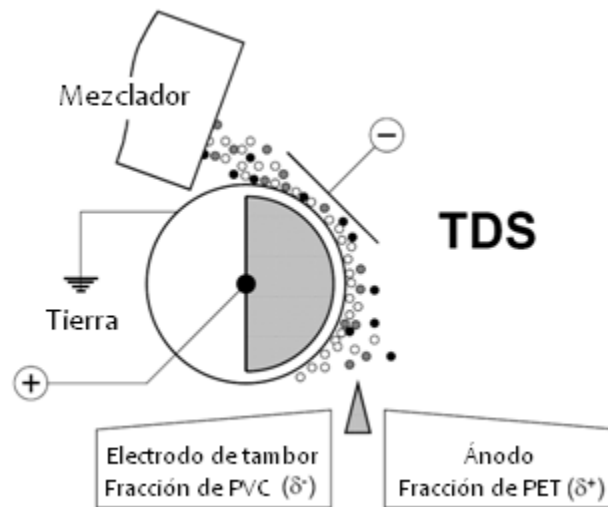
**c. Clasificación mediante aire (ciclones).** Es posible clasificar materiales mediante el uso de corrientes de aire. Esta separación también se basa en la densidad de los materiales, por ejemplo se puede separar plásticos en forma de film y residuos de papel de una mezcla de plásticos rígidos triturados. Las partículas de plásticos mixtos triturados son alimentadas verticalmente en el clasificador donde caen contra una columna ascendente de aire, causando que las partículas ligeras se separen de las más pesadas. La velocidad del aire en la corriente puede ser ajustada de acuerdo a las necesidades de separación. (VERC, 2005) (Tall, 2000)

**d. Flotación con espuma (Froth Flotation).** Este proceso se basa principalmente en el hecho de que las partículas hidrofílicas son bañadas por agua cuando se ponen en contacto con dicho fluido, y las partículas hidrofóbicas son bañadas por lípidos o grasas y burbujas de aire debido a su afinidad con dichos componentes. De manera que, al introducir burbujas de aire en una suspensión acuosa, las burbujas se adhieren a las partículas sólidas hidrofóbicas. Como resultado, el conjunto aire-sólido sube a la superficie,

formando una capa de espuma y logrando la separación de partículas hidrofílicas de las hidrofóbicas. Agentes de flotación, tal como depresores, activadores, colectores y/o espumantes, deben ser añadidos al medio líquido para lograr la separación. Este método separa plásticos de una mezcla de los mismos, con una alta pureza. Entre sus ventajas, se puede mencionar que el proceso es simple, es decir que no se necesita de alta tecnología, los químicos utilizados son de bajo costo y no son peligrosos. Este método puede ser utilizado para separar PET de PVC, lo cual no se logra con procesos de separación por densidad. (Bruno, s.f.) (VERC, 2005)

**e. Separación electrostática.** La carga electrostática de los diferentes plásticos puede ser utilizada para lograr separación. Existe una amplia variedad de equipos que se basan en el método electrostático. La forma más común de cargar los materiales es mediante efecto triboeléctrico, lo cual significa que las partículas son frotadas una contra la otra. Esto causa que algunos materiales se carguen positivamente y otros negativamente. Estos materiales se pueden separar al dejarlos caer libremente en un campo eléctrico provocado por dos electrodos de carga opuesta. Uno de los problemas es que es difícil controlar la fuerza gravitacional que actúa en las partículas que caen. Mediante este método es posible separar polímeros de densidad similar como PET de PVC y PE de PP. En la Figura 13 se muestra un ejemplo de separación electrostática. (VERC, 2005) (Tall, 2000)

Figura 13. Separación de PET y PVC mediante un separador triboeléctrico de tambor (TDS por sus siglas en inglés).



(VERC, 2005)

**f. Clasificación óptica.** El análisis de color es la tecnología de clasificación que más se acerca a la visión humana. En los métodos ópticos, una cámara registra una gran cantidad de datos visuales tal como longitud, ancho, área total de los objetos, así como su forma, color y estructura de la superficie. Usando algoritmos altamente sofisticados, las computadoras comparan estas características con objetos estándar descritos en una base de datos con lo cual los objetos pueden ser identificados. Un controlador de

corrientes de aire expulsa con precisión cada objeto seleccionado fuera de la corriente principal de plásticos o bien lo deja pasar, tal como se observa en la Figura 14. Esta tecnología puede ser aplicada eficientemente a objetos con un tamaño mínimo de 10 mm. Sin embargo, una de las desventajas es que cuando los objetos son muy pequeños, las corrientes de aire se llevan otros objetos al querer expulsar al seleccionado, ocasionando pérdidas de material de interés. (VERC, 2005)

La clasificación óptica puede ser utilizada para separar polímeros en base a su color o transparencia. El análisis de color se basa en dos técnicas: reflexión y transmisión. Esta tecnología hace posible separar polímero transparente de polímero coloreado. En estos separadores se pueden utilizar lámparas fluorescentes para iluminar los objetos. Detectores mono, bi o tricromáticos pueden ser utilizados para recolectar la información sobre color, y en el paso de clasificación, la expulsión o aceptación del objeto está determinada por el nivel de luz reflejada de la comparación con el valor de referencia. Los separadores por color generalmente alcanzan eficiencias de 95% de pureza en la corriente de material de interés. Para utilizar este tipo de tecnología es esencial que los plásticos sean razonablemente de tamaños similares, ya que si difieren mucho respecto al tamaño de la norma serán difícilmente transmitidos o expulsados (sobre todo los de gran tamaño) y no podrán ser separados de manera individual. (VERC, 2005)

Figura 14. Tecnología de clasificación óptica.



(VERC, 2005)

**Transmisión de imágenes de rayos-X.** Los detectores de rayos-X fueron los primeros utilizados ya que pueden reconocer recipientes de PVC de una corriente de botellas de PET con una alta capacidad. Cuando un rayo-X penetra un producto, este pierde parte de su energía. Dicha pérdida de energía está relacionada con la densidad del producto, de manera que este sistema detecta contaminantes de acuerdo a diferencias de densidad. Un sensor convierte la señal de energía en una imagen en escala de grises en la cual destaca el contaminante. Las imágenes obtenidas por transmisión de rayos-X de energía dual (DE-XRT por sus siglas en inglés) constituyen una herramienta poderosa para la inspección continua de materiales sólidos. Sistemas actuales detectan en tiempo real varias categorías de materia sólida basándose en diferencias en la composición atómica. Además, las imágenes revelan propiedades adicionales de los

materiales, tal como estructura interna, textura y forma. En la detección, no existe efecto asociado a los contaminantes de la superficie del material a analizar. Además, tampoco se presentan efectos por recubrimientos, irregularidades en la forma de la partícula, polvo y heterogeneidades locales. Esta técnica puede ser aplicada para clasificar residuos plásticos por tipo de polímero y para remover componentes que contengan halógenos o metales pesados. (VERC, 2005)

**g. Métodos de clasificación basados en espectroscopía.** Una amplia gama de métodos espectroscópicos pueden ser utilizados para identificar y clasificar residuos plásticos según el tipo de polímero. Entre estos métodos se puede mencionar: la espectroscopía de infrarrojo, espectroscopía Raman, espectroscopía de plasma inducida por láser, respuesta de impulso térmico inducido por láser, fluorescencia de rayos-X, entre otros. La espectroscopía de infrarrojo se divide a su vez en: infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés), infrarrojo medio (MIR por sus siglas en inglés), transformada de Fourier MIR, entre otros. (VERC, 2005)

La espectroscopía de infrarrojo cercano es la más ampliamente utilizada en la actualidad debido a su precisión para identificar diferentes polímeros. Los polímeros poseen una estructura única de carbono, hidrógeno y oxígeno, y cuando éstos son expuestos a ondas electromagnéticas del infrarrojo cercano (700-2500 nm), reflejan un espectro identificable. Las características únicas provienen de la naturaleza orgánica de los polímeros. La espectroscopía NIR no es recomendable para analizar materiales plásticos de color oscuro, sino sólo transparentes y ligeramente coloreados. La espectroscopía NIR es un buen método para la identificación de plásticos en residuos domésticos y de plásticos de ingeniería en productos de consumo masivo; esto debido a que diferentes espectros son encontrados en los polímeros comunes en residuos domésticos y post-industriales. (Sawyer, 2009) (VERC, 2005)

Las ventajas de la espectroscopía de infrarrojo cercano es que la identificación es confiable y rápida. Además, el equipo no contiene piezas móviles. Uno de los problemas principales con los métodos espectroscópicos es que sufren de insensibilidad cuando los materiales se encuentran contaminados con suciedad o pintura, y también en presencia de etiquetas de papel. Sin embargo, la espectroscopía NIR es comercialmente la tecnología más disponible, y ofrece una identificación efectiva de polímeros en menos de un segundo. Los métodos de espectroscopía regularmente se utilizan para clasificaciones a nivel macro, es decir que se aplican a recipientes enteros de plástico. (VERC, 2005)

**h. Sistema de marcadores fluorescentes.** Una de las alternativas para la clasificación automática de plásticos se encuentra en el área de sistemas marcadores. Este método consiste en marcar ya sea el contenedor o la resina en sí con algo fácilmente detectable. Una de las opciones es marcar los contenedores con una tinta invisible fácilmente detectable, sistema que fue desarrollado por Continental Container Corporation y que permite la separación por tipo de resina, color, aditivo y contenido del envase. Este sistema es costoso, principalmente al inicio de su aplicación ya que cada línea de producción de contenedores plásticos debe instalar un sistema marcador. Además, cada reciclador necesitaría instalar un equipo para escanear la marca en los contenedores. (Bruno, s.f.)

Otra alternativa fue desarrollada por Eastman Chemical Company, cuyo sistema utiliza un marcador molecular para identificar el tipo de resina. Uno de los aspectos positivos de este sistema es que el incremento del costo por la adición del marcador a la resina es relativamente bajo. Además, sólo se requeriría la participación de recicladores y productores de resina, que es un grupo significativamente pequeño en comparación a todos los productores de contenedores de plástico. Se han realizado estudios sobre el uso de colorantes fluorescentes como marcadores para la identificación de resinas, en los cuales se ha encontrado que éstos tienen una alta sensibilidad de detección y se pueden añadir en mínimas cantidades. (Bruno, s.f.)

**i. Clasificación por diferencias en la temperatura de fusión.** Este método se basa en las diferencias de la temperatura de fusión de los plásticos a separar. Sin embargo, se requiere que las diferencias sean significativas. La técnica consiste en un rodillo, banda u otro dispositivo de separación que se encuentra caliente y donde ocurre una termoadhesión selectiva de las partículas suavizadas por el calor (es decir que unas se adhieren mientras que el resto no). Las temperaturas de los dispositivos de separación se manejan de acuerdo a las temperaturas de fusión de los diferentes polímeros, logrando mediante etapas una separación completa. Este método se caracteriza por bajos costos de operación, pero requiere que las partículas de material formen una monocapa para una clasificación exitosa. Existen problemas de contaminación cuando se presentan etiquetas de papel en los recipientes a separar. (VERC, 2005)

**j. Disolución selectiva.** Este proceso separa residuos plásticos mezclados en polímeros casi puros y reusables sin necesidad de añadir al proceso técnicas de preclasificación mecánica. La técnica se basa en la disolución batch de una mezcla de plásticos mediante el uso de solventes. El mismo solvente puede ser utilizado para la separación de PS, LDPE, HDPE, PP y PVC, ya que estos polímeros se disuelven a diferentes temperaturas. Cuando la mezcla de polímeros se agrega al tanque de solvente, el PS se disuelve inmediatamente. La solución de PS es extraída y otro batch de solvente caliente (75°C) es añadido al tanque, disolviendo así el LDPE. Se extrae la solución de LDPE y se realiza nuevamente el mismo procedimiento a 120°C para disolver HDPE. Si se requiere separar PET y PVC, se utiliza una mezcla de solventes. Las soluciones extraídas en cada etapa se llevan a otros tanques donde se aplica calor para volatilizar el solvente y recuperar los polímeros según su tipo. (VERC, 2005)

Entre las ventajas de este método se puede mencionar que polímeros individuales pueden ser separados de mezclas complejas, las contaminaciones (como suciedad, tierra, residuos de comida) no causan problema, los requisitos de mano de obra son mínimos y los plásticos reciclados son químicamente y funcionalmente equivalentes a las resinas vírgenes. Respecto a las desventajas, grandes cantidades de solventes son utilizadas, aunque éstos pueden ser reciclados durante el proceso. Además, se debe controlar el nivel de solventes residuales en los polímeros y estabilizar el material separado ya que los aditivos se extraen durante la disolución. La disolución selectiva es una tecnología que aún se encuentra en investigación. (Bruno, s.f.) (VERC, 2005)

**3. Molienda.** La molienda consiste en la disminución de tamaño de partícula del material recolectado, con el objetivo de facilitar la siguiente operación dentro del proceso de reciclaje: el lavado del material picado (escamas de plástico) y su introducción en la cadena de producción (extrusión). Con la disminución del tamaño de partícula se aumenta la densidad aparente del plástico, minimizando así los costos de transporte. Además, se mejora la liberación de materiales que se encuentran adheridos en la superficie de los recipientes plásticos, tal como las etiquetas. (Berho, 2007) (Pascoe, 2000)

Todos los residuos plásticos han sido formados en productos finales antes de su uso. Previo al formado, la resina del material se encontraba en forma de gránulos o polvo. Por lo que es fácil apreciar el motivo de la disminución del tamaño de partículas durante el proceso de reciclado, pues se requiere obtener un producto lo más similar posible a la materia prima original. (Brandrup, 1996)

La etapa de molienda se lleva a cabo normalmente con el uso de molinos de cuchillas. Sistemas de cuchillas giratorias son utilizados universalmente para la reducción de tamaño de los plásticos en seco. Las cuchillas cortan el material hasta que éste sea lo suficientemente pequeño para caer a través de una malla o rejilla de tamaño determinado (generalmente de 10-12 mm). Sin embargo, los molinos de cuchillas giratorias no son los únicos disponibles, existe variedad de equipos destinados a la trituración de plásticos. (Brandrup, 1996) (Wansbrough & Yuen, s.f.) (ACOR, 2003)

**4. Lavado.** Las piezas de plástico triturado deben ser lavadas para remover etiquetas de papel, pegamento (utilizado para colocar las etiquetas), suciedad y cualquier remanente del producto que los plásticos hayan contenido. El lavado se realiza en caliente con una solución cáustica, detergente y/o desinfectantes por un período de al menos 12 minutos. La solución cáustica se prepara a bajas concentraciones de hidróxido de sodio, aproximadamente de 0.25 a 1.00 % p/v. La solución de lavado disuelve la grasa, suciedad y degrada las proteínas. Este proceso requiere además de largos períodos de remojo, una intensa agitación. La agitación durante el lavado actúa como un abrasivo, removiendo así el pegamento de las etiquetas y reduciendo las etiquetas de papel a fibras. El remojo se puede llevar a cabo en tanques de agitación (ya sea cerrados o abiertos ala atmósfera) o en transportadores de tornillo a bajas velocidades. Las bajas velocidades en los transportadores de tornillo aumentan el tiempo de residencia del material. (Brandrup, 1996) (Wansbrough & Yuen, s.f.) (ACOR, 2003)

Cuando el proceso ha terminado, se retira la solución de lavado (y los contaminantes suspendidos) del material de interés. La etapa de lavado puede ser aprovechada para separar plásticos por densidad, ya que al momento de la extrusión se debe alimentar por separado cada tipo de polímero para conservar las propiedades de cada componente a reciclar. (ACOR, 2003) (Brandrup, 1996)

**5. Secado.** Posterior al ciclo de lavado se realiza un proceso de secado con el propósito de eliminar la humedad remanente en el material, de manera que éste pueda ser correctamente procesado. La humedad se adhiere principalmente a la superficie del material plástico. Mientras mayor sea el área superficial del material, mayor humedad se adhiere a él. Existen dos alternativas para este proceso: secado mecánico y

secado térmico. Los procesos de secado mecánico constituyen costos menores de operación, pero no eliminan la totalidad de agua que contiene el material. La mayoría de sistemas de secado se construyen en tres etapas, incluyendo secado térmico en la última etapa. (Brandrup, 1996)

En el secado mecánico, la humedad es retirada del material a procesar mediante la fuerza de gravedad o inercia. Algunas partículas finas de suciedad que quedaron dispersas en el líquido luego del lavado también son separadas durante el secado mecánico. El secado térmico comprende tres diferentes mecanismos de transporte de calor: conducción, convección y radiación. La transferencia de calor por convección es el mecanismo que principalmente ocurre en el secado térmico de piezas de plástico triturado. Esto último se logra mediante corrientes de aire caliente en contacto directo con el material plástico. (Brandrup, 1996)

**6. Extrusión y filtración.** La extrusión consiste en fundir el material con el propósito de homogeneizarlo para su posterior procesamiento en productos finales. Durante la extrusión, la resina alimentada es reblandecida por acción del calor que proviene generalmente de resistencias eléctricas y de la fricción del elemento giratorio del equipo extrusor. En este proceso de fusión, el plástico es forzado e impulsado a salir a través de una boquilla metálica que le confiere forma definida y sección transversal constante. Generalmente durante el proceso de extrusión se lleva a cabo también un proceso de filtración. La filtración consiste en colocar una o varias cribas entre el tornillo extrusor y la boquilla final para remover impurezas sólidas remanentes que pueden afectar las características de los productos finales, sobretodo en productos plásticos con espesores de pared mínimos. (Garzón, s.f.) (Behro, 2007) (Vest, 2000)

**7. Manufactura de productos finales.** Entre las diferentes formas que se le puede dar al material en la etapa final de la extrusión se encuentran los pellets. El proceso de peletizado consiste en producir plástico en forma de espagueti que luego es cortado en pequeñas piezas para formar los llamados pellets. El objetivo del peletizado es obtener un material que posteriormente sea fácil de trabajar. Por varias razones se recomienda convertir las piezas limpias y secas de plástico triturado en pellets antes de su procesamiento final. Una de las razones es que durante el peletizado, el plástico reciclado puede ser coloreado o estabilizado. Además, como se mencionó, constituye un material fácilmente manejable (su tamaño es de 2-4 mm) y mejora la homogenización del material en los productos finales. Entre las técnicas aplicadas para la manufactura de productos finales a partir de pellets se encuentra el moldeo por inyección, por soplado, rotomoldeo, entre otras. (Vest, 2000) (ACOR, 2003) (Practical Action, SF)

Anteriormente el proceso de extrusión y peletizado culminaba el proceso de reciclado, quedando los pellets como producto final. Sin embargo, con el tiempo se ha aplicado tecnología en la que se puede incorporar directamente el plástico molido para la fabricación de productos finales, tal es el caso de la producción de fibras sintéticas. De manera que, actualmente el proceso de peletizado es opcional. (Behro, 2007)

### III. JUSTIFICACIÓN

Los patrones actuales de producción y consumo, así como la falta de consciencia ambiental, han ocasionado un aumento excesivo de desechos sólidos, entre éstos los de material plástico. Los materiales plásticos constituyen una alta demanda de producción dada su gran variedad de usos. Además, sus propiedades favorables en diferentes aplicaciones han causado que la industria de los mismos continúe en crecimiento; sin embargo, estos se caracterizan por ser poco amigables con el ambiente debido a que no se asimilan fácilmente por la naturaleza. En la actualidad, la producción anual de envases plásticos en el mundo sobrepasa los 200 millones de toneladas. Esta problemática ha ocasionado preocupación y búsqueda de soluciones, de donde surge la idea del reciclado de desechos plásticos.

La temática del reciclaje de plásticos se encuentra en auge y constante crecimiento, sin embargo, en países subdesarrollados no se le ha dado la importancia que merece, siendo pocas las empresas dedicadas a dicha actividad y mucho menos las que realizan algún tipo de investigación relacionada con el proceso de reciclaje. Además, actualmente en Guatemala el producto obtenido al final del proceso de reciclaje no se reprocesa en gran magnitud pues su calidad es más baja que la que caracteriza a la materia prima virgen, causando alteraciones en las propiedades de los productos plásticos. A la vez, esta menor calidad hace que el material reciclado carezca de valor monetario, obteniendo bajas utilidades. De ahí, la importancia de diseñar un proceso de reciclaje de plásticos que permita obtener un producto lo más cercano posible a una resina virgen, con el objetivo de utilizarlo como materia prima al 100%. Sin olvidar, que el proceso de reciclaje involucra la separación y buen uso de la basura, favoreciendo al ambiente de manera considerable.

A lo anterior, se agrega el hecho de que los desechos plásticos aún tienen valor. Esto debido a la energía que fue invertida para su elaboración, por lo que todavía pueden ser aprovechados para generación de utilidades y también para contrarrestar el impacto negativo que tienen en el ambiente y en la salud de las personas.

## IV. OBJETIVOS

### A. General:

Desarrollar un proceso de reciclaje de polímeros de desecho común a efecto de transformarlos en una resina útil que pueda utilizarse como materia prima en la elaboración de productos de calidad.

### B. Específicos:

1. Realizar pruebas experimentales con muestras de desechos plásticos rígidos post-consumo en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, para obtener datos de diseño.
2. Diseñar un proceso de clasificación de los polímeros a reciclar.
3. Diseñar una línea para el procesamiento de desechos plásticos rígidos post-consumo.
4. Realizar balance de masa y energía en la línea de reciclado.
5. Realizar el diagrama de flujo correspondiente al proceso.
6. Realizar una estimación de la inversión inicial para el montaje de la línea.

## **V. PROBLEMA A RESOLVER**

A pesar de tener influencia tanto de Europa y Estados Unidos sobre el control del medio ambiente, la industria del reciclaje en Guatemala aún no se encuentra desarrollada. Esto se debe en parte a que por ser un país en vías de desarrollo, el tema ambiental no es una prioridad. Además, no existen suficientes recursos destinados a investigación, por lo que, en cuanto al proceso de transformación, no existen avances significativos que promuevan el desarrollo de dicha actividad.

Por tales razones, las empresas más sobresalientes en reciclaje de plásticos en Guatemala no se dedican formalmente a reciclar, es decir a transformar los desechos post-consumo y reintroducirlos en un ciclo de vida, sino que solamente se tritura el material recolectado y se exporta para su posterior transformación en plantas extranjeras. La desventaja de esta actividad es que el material que se exporta se caracteriza por tener poco valor debido al grado de contaminación y mínima energía invertida en su transformación, lo cual causa que su precio de venta también sea bajo, obteniendo mínimas ganancias.

Debido a la problemática expuesta, en este trabajo se propone un proceso completo de transformación de desechos plásticos rígidos post-consumo, con el objetivo de proporcionar una base técnica a partir de la cual se generen proyectos formales de reciclaje, fomentando así una cultura responsable con el medio ambiente.

## VI. METODOLOGÍA

### A. Etapa preliminar de investigación

1. Revisión bibliográfica en libros e internet para conocer los conceptos básicos referentes al tema de polímeros, así como el contexto y situación actual de los desechos plásticos en el mundo y en Guatemala.
2. Visita a una de las plantas más importantes en reciclaje de plásticos en Guatemala, con el objetivo de conocer el proceso.
3. Definición de objetivos generales y específicos para el presente trabajo.
4. Revisión bibliográfica en libros e internet sobre las alternativas de recuperación de los desechos plásticos.
5. Revisión bibliográfica exhaustiva en libros, internet y videos referentes al proceso y a las etapas unitarias relacionadas con la actividad de reciclaje de plásticos.
6. Delimitación de polímeros específicos que serán procesados y reciclados.

### B. Etapa experimental

1. Después de la revisión bibliográfica sobre las diferentes opciones de tratamiento de los desechos plásticos post-consumo en el proceso de reciclaje, se realizaron pruebas experimentales a escala de laboratorio para determinar la eficiencia de clasificación o separación de plásticos mixtos aprovechando las diferencias en densidad entre los diferentes polímeros. Se utilizaron tres medios de separación, los cuales se describen a continuación:
  - a. Agua: separación de una corriente de termoplásticos mixtos en poliolefinas y no poliolefinas.
  - b. Solución salina al 25% p/v: separación de una corriente de no poliolefinas en PS y mezcla de PET con PVC.
  - c. Solución de etanol al 50% v/v: separación de una corriente de poliolefinas en HDPE y mezcla de PP con LDPE rígido.
2. Asimismo, se realizaron pruebas cualitativas de lavado de termoplásticos post-consumo con solución cáustica a diferentes concentraciones y a altas temperaturas para determinar la remoción de pegamento presente en los contenedores debido a la colocación de etiquetas.

**C. Etapa de diseño del proceso**

1. Propuesta del sistema de recolección de desechos plásticos post-consumo.
2. Tomando en cuenta la información recolectada tanto de la revisión bibliográfica como de los resultados experimentales, se diseñó el proceso de reciclaje de polímeros termoplásticos post-consumo, lo cual consistió en proponer etapas de transformación de la materia prima de entrada (desechos) así como la secuencia de las mismas. El diseño propuesto involucra en conjunto procesos de clasificación y transformación del material a reciclar.
3. Realización del diagrama de bloques (entradas y salidas) del proceso.
4. Determinación de la capacidad de procesamiento de desechos.

**D. Etapa de diseño y dimensionamiento de equipo**

1. A partir del diagrama de bloques del proceso, se determinó los equipos a utilizar para lograr el objetivo de cada una de las etapas.
2. Realización de balances de masa.
3. Dimensionamiento de equipo a partir de balances de masa (flujos de entrada de material).
4. Selección de equipo disponible en el mercado y determinación de las especificaciones de los mismos.
5. Diseño de tanques para etapas de separación por densidad y lavado.
6. Realización de balances de energía.
7. Realización del diagrama de flujo cuantitativo del proceso.

**E. Etapa de análisis económico**

1. Estimación de la inversión inicial para el montaje de la línea de reciclaje de polímeros termoplásticos post-consumo.

**F. Etapa final**

1. Redacción del informe final.

## VII. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos respecto a las pruebas experimentales realizadas (sección A) y al diseño final propuesto para el proceso de reciclaje mecánico (sección B).

### A. Resultados experimentales

*Tabla 4. Eficiencia de separación de polímeros termoplásticos (HDPE, PP, LDPE, PVC, PET, PS) mediante sus diferencias por densidad.*

Medio de separación	Materiales resultantes de la separación	Porcentaje medio de recuperación	Resultados visibles
Agua	Poliiolefinas	100.0452±0.0647%	Separación eficiente. Contaminaciones muy ligeras no significativas.
	No poliolefinas	100.0018±0.2488%	
Solución de etanol 50% v/v	HDPE	99.2482±1.3691%	Separación eficiente. Contaminaciones muy ligeras no significativas.
	PP y LDPE	100.7646±1.9131%	
Solución salina 25% p/v	PS	99.3498±2.8607%	Separación eficiente. Contaminaciones muy ligeras no significativas.
	PVC y PET	100.2946±1.9302%	

*Tabla 5. Resultados cualitativos del lavado de PET post-consumo a una temperatura de 70-75 °C por un período de 12 min.*

Concentración de NaOH (% p/v)	Resultados visuales
0.5	Remoción parcial de goma y restos de etiquetas
2.0	Remoción parcial de goma y restos de etiquetas
5.0	Remoción parcial de goma y restos de etiquetas
15.0	Remoción parcial de goma y restos de etiquetas

Para ver detalles respecto a las Tablas 4 y 5, favor consultar los resultados mostrados en la sección XII de APÉNDICE, literales A y B.

## B. Diseño del proceso de reciclaje mecánico

Tabla 6. Propuesta de sistema de recolección.

<b>Uso de contenedores especialmente identificados para la recolección no domiciliar de plásticos de desecho común</b>	
Objetivo del contenedor	Recuperación y posterior recolección de desechos plásticos RÍGIDOS post-consumo.
Ubicación de contenedores	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Centros comerciales</li> <li>– Instituciones educativas públicas y privadas (escuelas, institutos, colegios, universidades)</li> <li>– Restaurantes</li> <li>– Áreas de cualquier institución laboral en donde se generen desechos comunes y éstos sean recogidos por empresas habituales de recolección de basura (cafeterías, comedores, oficinas)</li> <li>– Lugares altamente transitados de la vía pública</li> </ul>
Características físicas del contenedor	Contenedor color BLANCO de plástico.
Desechos recolectados en el contenedor	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Botellas de agua, gaseosas y otras bebidas</li> <li>– Recipientes de leche, jugos y otros alimentos líquidos</li> <li>– Recipientes utilizados para alimentos sólidos.</li> <li>– Recipientes utilizados para productos no alimenticios tales como shampoo, jabones y detergentes, otros productos de limpieza, etc.</li> <li>– Platos, vasos y cubiertos desechables.</li> <li>– Objetos plásticos rígidos tales como cepillos, juguetes, lapiceros, etc.</li> </ul>
<b>Uso de bolsas especiales distribuidas gratuitamente en los hogares para la recolección de plásticos de desecho común</b>	
Objetivo de uso de la bolsa	Recuperación y posterior recolección de desechos plásticos RÍGIDOS post-consumo (domiciliares).
Sistema de distribución de las bolsas	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Las bolsas serán proporcionadas por empresas habituales de recogida de basura, con quienes se realizarán alianzas estratégicas.</li> <li>– Los hogares que desechen su basura clasificada de acuerdo a las bolsas mencionadas, tendrán el beneficio de pagar una cuota menor por la recogida de basura que los hogares que no clasifican.</li> </ul>
Características físicas de las bolsas	Bolsas plásticas de color BLANCO.
Desechos recolectados en la bolsa	– Misma descripción del sistema de recolección en contenedores blancos (mencionada anteriormente).

\*Nota: se propone colocar un sistema similar para la recolección de plásticos flexibles a manera de fomentar una cultura de reciclaje y estimular a la población a conocer aspectos básicos de los polímeros tal como la diferencia entre un plástico rígido y uno flexible, con lo cual se logrará que la recolección sea más eficiente (es decir que el producto recolectado tenga menos contaminantes por errores en la disposición). Sin embargo, en el presente trabajo no se considera el procesamiento de desechos de plástico flexible debido a la magnitud del trabajo necesario.

Figura 15. Diagrama de flujo cuantitativo del proceso de reciclaje.

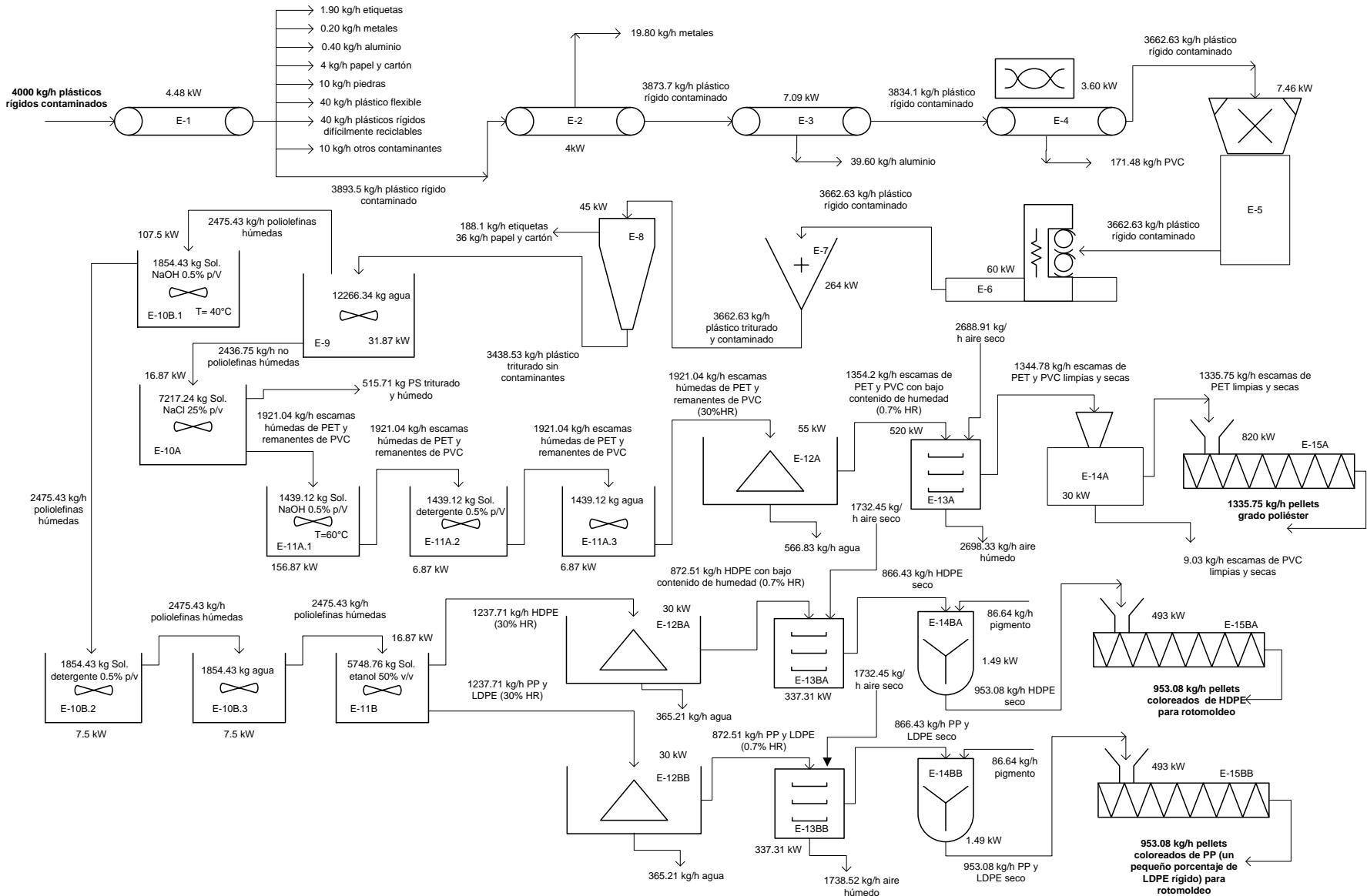


Tabla 7. Descripción de la primera parte del proceso de reciclaje de plásticos rígidos.

No. Etapa	Etapa	Objetivos de la etapa	Resultados
E-1	Macroclasificación y limpieza manual	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoción de plástico flexible que haya sido colocado erróneamente en contenedores y bolsas de color blanco.</li> <li>- Remoción de piedras, clavos, latas de aluminio, piezas metálicas, desechos de papel y otros contaminantes de gran tamaño.</li> <li>- Remoción de plásticos rígidos difícilmente reciclables, tal como juguetes, cepillos, lapiceros, recipientes de poliestireno expandido (EPS), piezas de etilvinilacetato (EVA), recipientes con elevada contaminación, cualquier objeto que constituya mezcla de polímero con otros materiales, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La corriente resultante de plásticos luego de esta etapa se conformará de botellas, recipientes u objetos (como los tapones de botellas) hechos de resina pura (PET, HDPE, LDPE, PVC, PS) y de contaminantes remanentes que serán eliminados en las posteriores etapas.</li> </ul>
E-2	Separación ferromagnética	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoción de metales ferromagnéticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corriente de plásticos mixtos libre de piezas metálicas.</li> </ul>
E-3	Separación de no féreos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoción de piezas de aluminio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corriente de plásticos mixtos libre de piezas de aluminio.</li> </ul>
E-4	Separación con tecnología rayos-X	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transmisión de rayos-X para la identificación y separación de PVC de la corriente de plásticos. Cuando el sistema detecta el PVC, una ráfaga de aire lo separa del resto de los residuos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corriente de plásticos mixtos libre de la mayor parte de PVC.</li> </ul>
E-5	Embalaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactar el material para facilitar su transporte y posterior corte en trozos pequeños, así como para disminuir su densidad aparente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fardos de plástico compactado listos para su transporte hacia la planta de procesamiento.</li> </ul>
E-6	Desembalaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separar las pacas de plástico compactado en unidades individuales para aumentar la fluidez de los plásticos durante el transporte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contenedores plásticos individuales de fácil fluidez.</li> </ul>
E-7	Molienda	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución del tamaño de partícula de los recipientes plásticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plástico rígido triturado, con un tamaño de partícula de 10-12 mm.</li> </ul>
E-8	Eliminación de partículas ligeras	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eliminación de papel, film de PP y LDPE proveniente de las etiquetas y polvo producido en la etapa de molienda. Este proceso se realiza sometiendo el plástico triturado a corrientes de aire en un ciclón.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plástico triturado libre de etiquetas, polvo proveniente de la trituración y partículas de papel y cartón.</li> </ul>
E-9	Separación por densidad de poliolefinas y no poliolefinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separar la corriente de plásticos mixtos triturados en dos corrientes: una de poliolefinas y otra de no poliolefinas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corriente de poliolefinas (HDPE, PP y LDPE rígido) separada de la corriente de no poliolefinas (PET, PS y remanentes de PVC).</li> </ul>

Tabla 8. Descripción de las etapas finales del proceso de reciclaje de PET a partir de la corriente de no poliolefinas (separada en la etapa No. 9).

No. Etapa	Etapa	Objetivos de la etapa	Resultados
E-10 <sup>a</sup>	Separación por densidad con solución salina	– Eliminación de piezas de PS de la corriente de PET.	– Corriente de PET triturado (y remanentes de PVC) libre de PS.
E-11A.1	Lavado en caliente con solución cáustica	– Eliminación de pegamento encontrado en el material debido a la colocación de etiquetas. Esto se logra con un tiempo de lavado de 12 min a 60°C y una concentración de 0.5% p/v de NaOH.	– Corriente de PET libre de pegamento.
E-11A.2	Lavado con detergente	– Eliminación de grasa, suciedad y restos de alimentos remanentes en el material plástico.	– Corriente de PET triturado limpio y con remanentes de detergente.
E-11A.3	Lavado de enjuague final	– Quitar remanentes de detergente de la fase de lavado anterior.	– Corriente de PET triturado limpio.
E-12 <sup>a</sup>	Secado mecánico	– Eliminar la mayor parte de humedad del material.	– Corriente de PET triturado con bajo porcentaje de humedad (0.7% HR).
E-13 <sup>a</sup>	Secado térmico	– Terminar la operación de secado eliminando la humedad remanente.	– Corriente de PET triturado seco (0.004% HR).
E-14 <sup>a</sup>	Separación electrostática	– Eliminación de remanentes de PVC en la corriente de PET.	– Corriente de PET libre de PVC.
E-15 <sup>a</sup>	Extrusión y peletizado	– Homogenización del material y transformación en productos finales.	– Pellets grado poliéster para su posterior procesamiento y producción de fibra.

Tabla 9. Descripción de las etapas del proceso referentes al tratamiento de poliolefinas después de haber sido separadas en la etapa No. 9.

No. Etapa	Etapa	Objetivos de la etapa	Resultados
E-10B.1	Lavado en caliente con solución cáustica	– Eliminación de pegamento encontrado en el material debido a la colocación de etiquetas. Esto se logra con un tiempo de lavado de 12 min a 40°C (para evitar decoloración) y una concentración de 0.5% p/v de NaOH.	– Corriente de poliolefinas (ya trituradas) libre de pegamento.
E-10B.2	Lavado con detergente	– Eliminación de grasa, suciedad y restos de alimentos remanentes en el material plástico.	– Corriente de poliolefinas limpias y con remanentes de detergente.
E-10B.3	Lavado de enjuague final	– Quitar remanentes de detergente de la fase de lavado anterior.	– Corriente de poliolefinas trituradas y limpias.
E-11B	Separación por densidad con solución de etanol	– Separar las partículas de HDPE del resto de material (PP y LDPE rígido).	– Corriente de HDPE separada de la mezcla de PP y LDPE rígido.







*Tabla 10. Descripción de las etapas finales del proceso de reciclaje de HDPE después de que éste fue separado en la etapa No. 11B.*

<b>No. Etapa</b>	<b>Etapa</b>	<b>Objetivos de la etapa</b>	<b>Resultados</b>
E-12BA	Secado mecánico	– Eliminar la mayor parte de humedad del material.	– Corriente de HDPE triturado con bajo porcentaje de humedad (0.7% HR).
E-13BA	Secado térmico	– Terminar la operación de secado eliminando la humedad remanente.	– Corriente de HDPE triturado y seco (0.004% HR).
E-14BA	Mezclado	– Adición de pigmento como aditivo colorante y protector contra rayos UV. – Homogenización de la mezcla.	– Mezcla homogenizada de HDPE triturado, limpio y seco, con aditivo.
E-15BA	Extrusión y peletizado	– Homogenización del material y transformación en productos finales.	– Pellets de color negro para su posterior uso en rotomoldeo.






*Tabla 11. Descripción de las etapas finales del proceso de reciclaje de PP después de que éste fue separado en la etapa No. 11B.*

<b>No. Etapa</b>	<b>Etapa</b>	<b>Objetivos de la etapa</b>	<b>Resultados</b>
E-12BB	Secado mecánico	– Eliminar la mayor parte de humedad del material.	– Corriente de PP (y un pequeño porcentaje de LDPE rígido) triturado con bajo porcentaje de humedad (0.7% HR).
E-13BB	Secado térmico	– Terminar la operación de secado eliminando la humedad remanente.	– Corriente de PP (y un pequeño porcentaje de LDPE rígido) triturado y seco (0.004% HR).
E-14BB	Mezclado	– Adición de pigmento como aditivo colorante y protector contra rayos UV. – Homogenización de la mezcla.	– Mezcla homogenizada de PP (y un pequeño porcentaje de LDPE rígido) triturado, limpio y seco, con aditivo.
E-15BB	Extrusión y peletizado	– Homogenización del material y transformación en productos finales.	– Pellets de color negro para su posterior uso en rotomoldeo.


Tabla 12. Especificaciones de equipo seleccionado para el proceso de reciclaje propuesto.

Equipo	Etapa del proceso	Especificaciones		
	Banda transportadora	Clasificación manual	Ancho	47 ½"
			Largo	150"
			Potencia del motor	2 hp
			Equipos necesarios	3
	Banda transportadora	Transporte entre etapas durante el proceso	Ancho	47 ½"
			Largo	100"
			Potencia del motor	2 hp
			Equipos necesarios	7
	Transportador de tornillo	Transporte de PET de secado mecánico a térmico/de secado térmico a separación electrostática/de separación electrostática a extrusión	Capacidad	180 – 1.49 pie <sup>3</sup> /h (a Máx. rpm y 1 rpm)
			Diámetro/largo tornillo	6"/25'
			Máxima velocidad de rotación	120 rpm
			Velocidad de rotación para la capacidad requerida (43 pie <sup>3</sup> /h)	29 rpm
			Potencia del motor	2.5 hp
			Equipos necesarios	3
	Transportador de tornillo	Transporte de material del molino hacia el air classifier	Capacidad	180 – 1.49 pie <sup>3</sup> /h (a Máx. rpm y 1 rpm)
			Diámetro/largo tornillo	6"/25'
			Máxima velocidad de rotación	120 rpm
			Velocidad de rotación para la capacidad requerida (116 pie <sup>3</sup> /h)	77 rpm
			Potencia del motor	2.5 hp
			Equipos necesarios	1
	Transportador de tornillo	Transporte de secado mecánico a secado térmico y de secado térmico a mezcladores en líneas de poliolefinas	Capacidad	180 – 1.49 pie <sup>3</sup> /h (a Máx. rpm y 1 rpm)
			Diámetro/largo tornillo	6"/25'
			Máxima velocidad de rotación	120 rpm
			Velocidad de rotación para la capacidad requerida (28 pie <sup>3</sup> /h)	19 rpm
			Potencia del motor	2.5 hp
			Equipos necesarios	4
	Separador ferromagnético	Separación de metales ferromagnéticos	Largo	3000 mm
			Ancho	1400 mm
			Alto	520 mm
			Velocidad de traslación	1.2 – 1.6 m/s
			Consumo energético	4 kW


Continuación tabla 12.

Equipo	Etapa del proceso	Especificaciones					
	Separador Eddy Current	Separación de aluminio	Capacidad	6 ton/h			
			Ancho útil de la banda	30"			
			Ancho total del equipo	89"			
			Longitud total del equipo	134"			
			Potencia del motor de la banda transportadora	2 hp			
			Potencia del motor del rotor	7.5 hp			
			Equipos necesarios	1 unidad			
	VinylCycle	Separación de PVC	Capacidad	10 botellas/s			
			Pureza del producto	≈ 50 ppm			
			Requerimientos energéticos	120 V AC, 50/60 Hz, 30 A			
			Aire	90 psi/60 SCFM			
			Compañía desarrolladora	National Recovery Technologies Inc. (NTR)			
			Equipos necesarios	3 unidades			
				Embaladora	Embalaje	Capacidad (peso del fardo)	80 kg
Ciclo de trabajo	60 s						
Dispositivo de transporte del fluido neumático	Bomba de desplazamiento positivo de engranes						
Potencia del motor de la bomba	10 hp						
Peso	3000 kg						
Alto	3590 mm						
Largo	2900 mm						
	Abre balas	Separación de balas de plástico en unidades individuales	Ancho	1920 mm			
			Consumo de energía	30 kW			
			Equipos necesarios	2 unidades			
				Molino de cuchillas	Molienda (disminución de tamaño de partícula)	Capacidad	2500 kg/h
						Consumo de energía	132 kW
						Abertura de alimentación	720x1170 mm
						Equipos necesarios	2 unidades







Continuación tabla 12.

Equipo	Etapa del proceso	Especificaciones		
	Ciclón (Air classifier)	Eliminación de partículas ligeras (etiquetas y papel)	Capacidad	3500 kg/h
			Potencia del motor del ventilador	15 kW
			Potencia del motor del rotor	7.5 kW
			Flujo de aire	2500 m <sup>3</sup> /h
			Equipos necesarios	2 unidades
Tanque abierto a la atmósfera con agitación	Separación por densidad de poliolefinas y no poliolefinas	Capacidad	17 m <sup>3</sup> (17000 l)	
		Medio de separación	Agua	
		Material	Acero inoxidable	
		Método de extracción de no poliolefinas	Transportador de tornillo	
		Método de extracción de poliolefinas	Pala industrial de acero inoxidable	
		Motor del agitador	30 kW	
		Motor del transportador de tornillo	2.5 hp	
		Equipos necesarios	1	
Tanque abierto a la atmósfera con agitación	Separación por densidad de PET y PS	Capacidad	9 m <sup>3</sup> (9000 l)	
		Medio de separación	Solución salina al 25% p/v	
		Material	Acero inoxidable	
		Método de extracción de PET	Transportador de tornillo	
		Método de extracción PS	Pala industrial de acero inoxidable	
		Motor del agitador	15 kW	
		Motor del transportador de tornillo	2.5 hp	
		Equipos necesarios	1	
Tanque abierto a la atmósfera con agitación	Separación por densidad de HDPE y PP con LDPE	Capacidad	9 m <sup>3</sup> (9000 l)	
		Medio de separación	Solución de etanol al 50% v/v	
		Material	Acero inoxidable	
		Método de extracción de PP y LDPE	Transportador de tornillo	
		Método de extracción HDPE	Pala industrial de acero inoxidable	
		Motor del agitador	15 kW	
		Motor del transportador de tornillo	2.5 hp	
		Equipos necesarios	1	

Continuación tabla 12.

Equipo	Etapa del proceso	Especificaciones		
Tanque enchaquetado con agitación	Lavado en caliente de escamas de PET	Capacidad	3 m <sup>3</sup> (3000 l)	
		Material	Acero inoxidable	
		Método de extracción de PET	Transportador de tornillo	
		Motor del agitador	5 kW	
		Motor del transportador de tornillo	2.5 hp	
		Potencia del calentador eléctrico	150 kW	
		Equipos necesarios	1 unidad	
Tanque abierto a la atmósfera con agitación	Segunda y tercer etapa de lavado de escamas de PET	Capacidad	3 m <sup>3</sup> (3000 l)	
		Material	Acero inoxidable	
		Método de extracción de PET	Transportador de tornillo	
		Motor del agitador	5 kW	
		Motor del transportador de tornillo	2.5 hp	
		Equipos necesarios	2 unidades (1 por c/etapa de lavado)	
Tanque enchaquetado con agitación	Lavado en caliente de escamas de poliolefinas	Capacidad	3.5 m <sup>3</sup> (3500 l)	
		Material	Acero inoxidable	
		Motor del agitador	7.5 kW	
		Potencia del calentador eléctrico	100 kW	
		Equipos necesarios	1 unidad	
Tanque abierto a la atmósfera con agitación	Segunda y tercer etapa de lavado de escamas de poliolefinas	Capacidad	3.5 m <sup>3</sup> (3500 l)	
		Material	Acero inoxidable	
		Método de extracción del material lavado	Pala industrial de acero inoxidable	
		Motor del agitador	7.5 kW	
		Equipos necesarios	2 unidades (1 por c/etapa de lavado)	
	Secador centrífugo	Secado mecánico en la línea de reciclaje de PET	Capacidad	2500 kg/h
			Consumo energético	55 kW
			Diámetro del rotor	1000 mm
			Longitud del rotor	500 mm
			Peso	3000 kg
			Equipos necesarios	1 unidad

Continuación tabla 12.

Equipo	Etapa del proceso	Especificaciones		
	Secador centrífugo	Secado mecánico en las líneas de reciclaje de poliolefinas	Capacidad	1500 kg/h
			Consumo energético	30 kW
			Diámetro del rotor	500 mm
			Longitud del rotor	1200 mm
			Peso	2000 kg
			Equipos necesarios	2 unidades
	Secador térmico	Secado térmico en las líneas de reciclaje de PET, HDPE y PP	Capacidad	1200 kg/h
			Potencia del motor del ventilador	50 hp
			Potencia del calentador eléctrico	300 kW
			Equipos necesarios	3
	Secador térmico	Secado térmico en la línea de reciclaje de PET	Capacidad	600 kg/h
			Potencia del motor del ventilador	20 hp
			Potencia del calentador eléctrico	150 kW
			Equipos necesarios	1 unidad
	Separador electrostático Hamos EKS-PET	Eliminación de remanentes de PVC de la corriente de escamas de PET	Capacidad	1500-2250 kg/h
			Eficiencia de separación	> 95 %
			Características de operación	Separación en seco
			Características de la corriente de entrada	Escamas limpias y secas, tamaño de partícula de 2 a 12 mm, HR < 1%
			Pérdidas de PET	Mínimas
			Consumo de energía	≈ 30 kW
			Equipos necesarios	1 unidad
	Mezclador vertical	Homogenización de plástico con aditivos en líneas de HDPE y PP	Capacidad	1000 l
			Potencia del motor	2 hp
			Peso	300 kg
			Equipos necesarios	2
	Extrusora	Extrusión y peletizado en la línea de reciclaje de PET	Capacidad	1700 kg/h
			Zonas de calentamiento	8
			Potencia de calentamiento	160 kW
			Potencia del motor DC	660 kW
			Rotación del tornillo	78 rpm
			Diámetro del tornillo	200 mm
Equipos necesarios	1 unidad			

Continuación tabla 12.



Equipo	Etapa del proceso	Especificaciones		
	Extrusora	Extrusión y peletizado en la línea de reciclaje de HDPE y PP	Capacidad	1200 kg/h
			Zonas de calentamiento	6
			Potencia de calentamiento	93 kW
			Potencia del motor DC	400 kW
			Rotación del tornillo	98 rpm
			Diámetro del tornillo	160 mm
			Equipos necesarios	2 unidades
	Compresor	En equipos necesarios	Tipo de compresor	De tornillo
			Fuente de energía	Motor eléctrico
			Flujo molar de aire	0.0038 kmol/s
			Potencia requerida	35 kW
			Equipos necesarios	1 unidad

Figura 16. Diseño propuesto de los tanques utilizados en las etapas de separación por densidad.

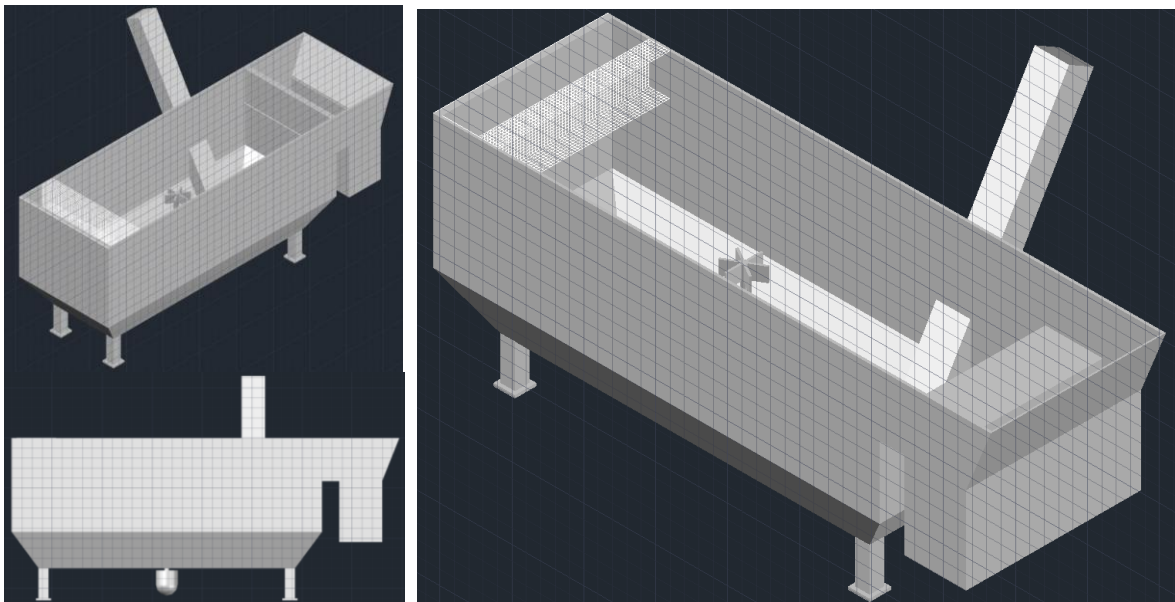


Figura 17. Balance de masa global (Diagrama de entradas y salidas)

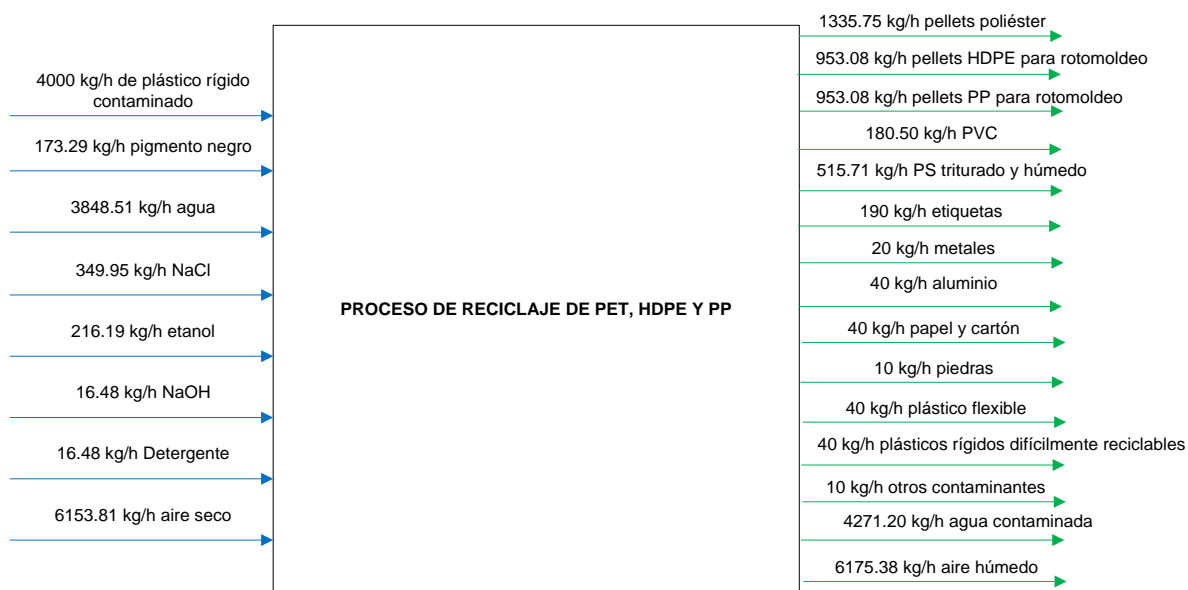


Tabla 13. Balance global de energía.

Consumo de energía eléctrica por unidad másica de producto	Consumo energético total por unidad másica de producto
1.22 kW-h/kg pellets	1.22 kW-h/kg pellets

Tabla 14. Inversión inicial del proyecto (equipo) y período de recuperación de la misma.

Costo total en equipo	\$ 6,214,795.02
Instalación de equipo	\$ 1,429,402.85
Instalación eléctrica	\$ 1,553,698.75
Instrumentación	\$ 621,479.50
Imprevistos	\$ 1,615,846.70
<b>INVERSIÓN INICIAL TOTAL EN EQUIPO</b>	<b>\$ 11,435,222.84</b>
<b>PERÍODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN EN EQUIPO</b>	<b>Q 89,652,147.03*</b>
	0.20 año

\*Correspondiente a un tipo de cambio de Q7.84 (Banco de Guatemala, 05/01/12)

## VIII. DISCUSIÓN

Diseñar un proceso de reciclaje no es tan sencillo, ya que, como se mencionó en la sección de antecedentes, se encuentran disponibles muchos métodos y tecnologías para tratar los desechos plásticos. No existe en la literatura reglas generales que proporcionen un indicio de la secuencia de las etapas del proceso, sino que es posible diseñar muchos y diferentes procesos mediante la combinación y acomodamiento de las varias opciones de tratamiento. Sin embargo, en todos los casos se sabe que el fin es reprocesar los materiales de manera individual respecto a su composición química, ya que cada tipo de resina posee diferentes propiedades y obtener productos a partir de mezclas genera problemas durante su procesamiento y éstos se caracterizan por poseer baja calidad. Esta última es ésta talvez la única regla general que se debe tomar en cuenta al diseñar cualquier proceso de reciclaje de polímeros. No obstante, ésta es también el problema mayor que se presenta respecto a la actividad de reciclaje, obtener productos eficientemente clasificados y libres de contaminantes, razón por que existen muchas opciones y tecnologías para aumentar la pureza del material tratado.

Sabiendo lo anterior, los parámetros tomados en cuenta en este trabajo para diseñar el proceso de reciclaje fueron: las características de la corriente de entrada, es decir el grado de contaminación de la materia prima a tratar, y, el destino del material reprocesado. Con lo anterior, es posible identificar las etapas necesarias en el proceso para obtener un producto con los requerimientos adecuados para su posterior uso en la industria manufacturera de plásticos.

Debido a que es necesario tomar en cuenta el grado de contaminación y características de los desechos que serán procesados para realizar el diseño, es conveniente involucrarse no solo en la parte técnica de la planta procesadora, sino también en el sistema de recolección. En la Tabla 6 (página 37) de la sección de resultados se describe el sistema de recolección propuesto para la corriente de desechos plásticos a transformar. Tal como se detalla en dicha tabla, se propone un sistema de recolección en contenedores para la recolección no domiciliar y en bolsas especiales para la recolección en los hogares. Los contenedores y bolsas serán destinados a la recolección y pre-clasificación únicamente de plásticos rígidos, que representan el material de interés.

Entre las ventajas identificadas respecto a este sistema de recolección se puede mencionar que se obtienen desechos con un bajo porcentaje de contaminación debido a que no se ponen en contacto con otros materiales de desecho común; aspecto que no ocurre cuando el material es recuperado de los vertederos. Además, el costo del material no es elevado ya que éste no se somete a un proceso formal de clasificación, sino que se es preclasificado al momento en que las

personas depositan los materiales en el contenedor adecuado, con lo cual también se fomenta una cultura de reciclaje en las personas. Asimismo, cabe mencionar que dado a que el material se recoge de manera simultánea con la recogida habitual de basura, los costos adicionales en combustible para la recolección de desechos plásticos rígidos no son elevados. Referente a las desventajas, se debe considerar la inadecuada disposición de los desechos en los recipientes y bolsas proporcionadas, por lo que el material recolectado siempre contendrá contaminantes. Para el diseño del proceso se estimó que la presencia de contaminantes en la corriente recolectada comprende el 5% en peso del material total.

La corriente recolectada de plásticos rígidos está compuesta por los termoplásticos más comunes que se utilizan ampliamente en empaque y embalaje (PET, HDPE, PP, PS, PVC y LDPE rígido). Asimismo, entre los posibles contaminantes se encuentran metales, aluminio, piedras, etiquetas, papel y cartón, plástico flexible, plásticos rígidos difícilmente reciclables (plásticos termofijos, productos hechos de mezclas de plástico, entre otros) y otros contaminantes. De acuerdo al diseño mostrado en la Figura 15 (página 38), la eliminación de las piedras, plástico flexible y plásticos no reciclables se realiza en una primera etapa de clasificación manual, donde personal capacitado y con experiencia descarta dichos materiales. En esta etapa de clasificación manual también se lleva a cabo la eliminación parcial de otros contaminantes de gran tamaño. La remoción de metales y de aluminio se realiza en procesos continuos mediante un separador ferromagnético y un separador Eddy Current, respectivamente.

Debido a que se posee una mezcla de polímeros de diferentes tipos, es necesario clasificarlos o separarlos por resina. En la sección de antecedentes se citan varios métodos para realizar identificación y separación de polímeros según su tipo, sin embargo, la separación por densidad es una de las opciones que representa menor costo de inversión. Además, la separación por densidad constituye un método simple, mínimas repercusiones en el ambiente y utiliza recursos accesibles (agua, sal común y etanol). Por esta razón, se procedió a realizar pruebas experimentales de separación por densidad a nivel de laboratorio para determinar la eficiencia de clasificación o separación. Los resultados resumidos de las pruebas se muestran en la Tabla 4 (página 36), y en las Tablas 15-18 (páginas 63 y 64) y Figuras 18-23 (páginas 64-66) de la sección de apéndice, se encuentran los resultados con mayor detalle. Este proceso es altamente eficiente, ya que se obtuvieron porcentajes de recuperación muy cercanos al 100% para cada tipo de resina. Visualmente se comprueba el buen funcionamiento del método para realizar tales separaciones, por lo que estas etapas de separación fueron tomadas en cuenta en el diseño propuesto (Figura 15, página 38).

En la Figura 16 (página 47) se presenta el diseño propuesto de los tanques de separación por densidad para las etapas mencionadas con anterioridad. En estos tanques se alternan tiempos de agitación, reposo y de recolección de las corrientes separadas para que sigan su curso en el proceso. La forma de recolección de las corrientes separadas se realiza mediante el uso de un transportador de tornillo (colocado en la parte lateral e inferior del tanque) que extrae del fondo la corriente de plásticos más pesada, y una pala industrial tipo malla que recolecta de la superficie el material ligero que flota. La agitación (motor y agitador) se encuentra colocada en el fondo de manera que no interfiera con la recolección del material que flota en la superficie (ver Figura 16).

Sin embargo, no todos los polímeros se pueden separar por densidad, ya que algunos plásticos se caracterizan por tener densidades muy parecidas (ver Tabla 1, página 10). Como se observa en los resultados de la parte experimental, el PVC no puede ser separado del PET, y tampoco se puede separar el LDPE rígido del PP. Sin embargo, tomando en cuenta que la cantidad del LDPE rígido en la corriente de entrada es mínima debido a que la mayor parte de LDPE se utiliza como material flexible, no se aplica ninguna etapa en el proceso para eliminar éste material del PP. Además, el PP y LDPE son polímeros compatibles, por lo que no separarlos representa una buena opción.

Como se mencionó en la sección de antecedentes, es necesario eliminar el contenido de PVC, y dado que no se puede descartar mediante diferencias por densidad, se recurre al uso de tecnología rayos-X para realizar una macroclasificación (clasificación de contenedores completos) y eliminación de contenedores de PVC. La tecnología rayos-X representa un alto costo de inversión en equipo, sin embargo, de los métodos disponibles para descartar este material, es el más eficiente. Es posible aplicar la clasificación manual, pero remover todo el PVC sería un proceso lento dada la capacidad de procesamiento de la línea (4000 kg/h). Además, en la clasificación manual no se garantiza la ausencia de errores, por lo que sería necesario colocar posteriormente otro mecanismo de separación para separar los remanentes (variables) y completar la eliminación total de PVC. La separación electrostática también es capaz de retirar el PVC, pero éste es un método de microclasificación (se aplica a plástico ya triturado), y por el tamaño de las partículas tratadas la eficiencia de separación es menor. En este último método, fácilmente partículas de PVC se transportan entre las otras y viceversa, perdiendo parte del material entre la corriente de contaminantes y obteniendo una pureza menor en el material de interés. Por las razones mencionadas, la tecnología rayos-X es el método más adecuado y para esto se utiliza el equipo VinylCycle.

De acuerdo a las especificaciones del equipo VinylCycle desarrollado por National Recovery Technologies, se obtiene un producto con una concentración remanente de PVC de aproximadamente 50 ppm, y este mínimo contenido se elimina por completo en una etapa posterior. La remoción de PVC con tecnología rayos-X es la cuarta etapa en el proceso (E-4), y se lleva a cabo después de la separación de no férricos con el equipo Eddy Current. La separación con tecnología rayos-X es la última etapa de macroclasificación.

Luego de que el producto pasa por las distintas etapas de macroclasificación, la corriente de plásticos se dirige hacia una embaladora con el objetivo de compactar el material y facilitar su transporte hacia la planta de procesamiento. Además, con el embalaje se disminuye la densidad aparente y se facilita el manejo del mismo. En la planta procesadora es necesario abrir las balas, separando los desechos en recipientes individuales para que éstos fluyan a través de las diferentes etapas. La operación siguiente en el proceso es la molienda, etapa que se lleva a cabo en molinos de cuchillas, reduciendo el material hasta un tamaño de partícula de 10-12 mm.

Al triturar el material, las etiquetas se desprenden de sus contenedores y son trituradas junto con los plásticos rígidos. Para eliminar dicha contaminación se hace uso de un ciclón (air classifier) que separa las partículas ligeras (papel y plástico en forma de film) de las gruesas (plásticos rígidos triturados). Al haber eliminado las etiquetas y papel, la corriente de plásticos triturados se somete a varias separaciones por densidad utilizando agua, solución salina al 25% p/v y solución de etanol al 50% v/v como medios de separación.

Las etapas de separación por densidad se combinan con etapas de lavado para eliminar suciedad, grasa y restos de alimentos que los desechos puedan contener. La etapa de lavado se divide en 3 fases, la primera se realiza sometiendo la corriente de plásticos a una solución diluida de NaOH a altas temperaturas y con constante agitación. Para el lavado del PET con solución cáustica, se trabaja a una temperatura de 60° y un período de agitación de 12 minutos (recomendado por la literatura). Para el lavado de las poliolefinas se trabaja a una temperatura menor: 40°C, para evitar la decoloración del material, y el mismo período de agitación de 12 minutos. Las temperaturas propuestas para la primera etapa de lavado se basan en puntos de fusión ya sea del material de interés o de los contaminantes remanentes. El objetivo del lavado alcalino en caliente es remover de las piezas trituradas, el pegamento que se añade a los contenedores plásticos al colocar las etiquetas. Para determinar el contenido necesario de NaOH en la solución de lavado, se realizaron pruebas experimentales a diferentes concentraciones para evaluar de manera cualitativa la remoción del pegamento. Los resultados de estas pruebas se

muestran en la Tabla 5 (página 36) y en la sección de apéndice en la Tabla 19 y Figura 24 (página 67). Durante las pruebas de lavado se observó que la remoción de pegamento fue parcial y que no hubo diferencias significativas al aumentar la concentración de NaOH. Por tal razón, se concluyó que el pegamento utilizado en la industria guatemalteca no es soluble en soluciones cáusticas, de manera que se debe investigar la composición del pegamento y realizar nuevas pruebas para lograr la remoción total del mismo. Para el presente diseño se propone una concentración de 0.5% p/v, ya que recomiendan en la literatura que se encuentre en un rango de 0.25 y 1.0 %.

La segunda fase de lavado consiste en tratar la corriente de plásticos con una solución diluida de detergente. Finalmente, en la última fase se lleva a cabo un enjuague final para remover restos de detergente y suciedad. Seguido a la etapa de lavado se realiza el secado de las partículas plásticas en corrientes por separado de acuerdo al tipo de resina; esto se debe a que el contenido de humedad provoca problemas durante la extrusión, causando una caída en la viscosidad y una reducción del peso molecular. El secado se realiza en dos etapas: secado mecánico y secado térmico, obteniendo una humedad relativa final de 0.004%, lo cual es equivalente a 50 ppm.

La corriente de PET (y restos de PVC) limpio y seco se hace pasar por una microclasificación utilizando el método de separación electrostática para remover las partículas remanentes de PVC. En seguida, el material está listo para ser extruido y peletizado en gránulos destinados a la producción de fibra de poliéster. Respecto a las corrientes de los dos polímeros restantes (HDPE y PP), luego del secado cada una de éstas pasa por separado a una etapa de mezclado en donde se le agrega un colorante negro, para dirigirse seguidamente hacia la etapa de extrusión y peletizado.

Se decidió utilizar los pellets de HDPE y PP para la posterior manufactura de productos de rotomoldeo. La razón de destinar dichos productos a la industria de rotomoldeo es que de esta manera no es necesario clasificar y reciclar el HDPE y PP de acuerdo a su color, sino que se procesa en conjunto y se agrega un aditivo colorante (negro) que a la vez actúa como protector contra rayos ultravioleta, para obtener pellets que pueden ser utilizados para producir tanques domiciliarios o industriales de almacenamiento de agua, en donde el color no es un aspecto importante para la venta de los mismos.

Es importante mencionar que al momento de decidir el destino de los productos finales se pensó en no fabricar productos de tiempo de vida corta (tal como los de embalaje), ya que son productos que regresarán rápidamente a la basura, cuyo reciclaje por segunda vez ya no es

aconsejable por la baja calidad que se obtiene en el producto final (debido a la degradación térmica que sufre el material al ser reciclado).

Luego de haber definido las etapas y secuencia de las mismas, se procedió a hacer balances de masa, cuyos resultados globales se especifican en la Figura 17 (página 48), y cuyo detalle se muestra en la sección de apéndice. En resumen, la producción anual de pellets grado poliéster es de 10,579.17 ton/año, mientras que para pellets de HDPE y PP es de 8,234.59 ton/año por cada resina. Además, se determinó mediante el consumo energético de todos los equipos utilizados en el diseño propuesto, que el gasto energético por unidad de masa de cualquiera de los productos es de 1.22 kW-h/kg (4.40 MJ/kg). Cabe mencionar que, la totalidad de consumo de energía se atribuye a energía eléctrica ya que no fue necesario suministrar energía en forma de calor. Como parámetro de referencia, la energía utilizada para producir resina virgen de PET a partir del petróleo es de 70-83 MJ/kg (Gleick & Cooley, 2009), lo cual indica un ahorro energético de aproximadamente 65 MJ/kg al producir resina a partir del proceso de reciclaje que aquí se propone.

Debido a la magnitud de los subproductos obtenidos, es necesario buscar alternativas para aprovechar los mismos. Una de éstas es vender los materiales para su procesamiento en plantas externas. Asimismo, puede considerarse la opción de recuperación energética mediante incineración de los polímeros difícilmente reciclables, plásticos flexibles, entre otros.

En la Tabla 12 (páginas 42-47) se muestran las especificaciones técnicas del equipo necesario que cumplen con las capacidades requeridas para el proceso de reciclaje propuesto. Como se observa en la Tabla 14 (página 48), la inversión inicial para la puesta en marcha del proyecto es alta debido a la gran cantidad de equipo necesario. En los costos de inversión se tomó en cuenta un porcentaje destinado a instrumentación ya que es indispensable que los tanques de separación y lavado se encuentren automatizados para controlar las densidades y temperaturas de las soluciones, respectivamente. De esta manera se logrará que estas etapas se lleven a cabo eficientemente.

De acuerdo al balance de masa, se realizó el dimensionamiento del equipo (capacidad) tomando en cuenta un factor de seguridad de 1.25, a manera de garantizar que el equipo cumpla con la capacidad necesaria para procesar la cantidad establecida de 4000 kg/h de material recolectado. Asimismo, se realizaron cálculos para dimensionar el compresor, partiendo de las requisiciones de aire en los equipos utilizados. Estos cálculos de dimensionamiento se muestran en la sección D del apéndice. Luego de determinar la potencia requerida por el compresor se

decidió utilizar un compresor de tornillo, lo cual se debe a que éstos se adecuan a pequeños rangos de presión (costo menor) y a que constituye uno de los más comunes en la industria.

Las especificaciones de la Tabla 12 (páginas 42-47) corresponden a los equipos disponibles en el mercado que más se adecuaron con los cálculos de dimensionamiento mostrados en la Tabla 33 (páginas 85-86). En algunas operaciones se colocó más de un equipo ya que no se encontraron equipos que desempeñaran la capacidad total, por lo que al colocar varios se cumplió con lo requerido. El cálculo de consumo energético se realizó de acuerdo a las especificaciones encontradas para los equipos.

En la Tabla 37 (página 90) de la sección de apéndice se muestra la requisición o consumo de agua al día, y como se observa existe un alto consumo de agua ( $92.36 \text{ m}^3/\text{día}$ ) debido a las etapas de lavado y separaciones por densidad. Por esta razón es recomendable considerar la opción de una planta de tratamiento para disminuir descarga de contaminación, así como para disminuir costos de operación al recircular el agua tratada. También se propone dar continuación al presente trabajo mediante el desarrollo de otros proyectos tales como la recuperación del etanol utilizado, el diseño de un proceso de reciclaje de plástico flexible, entre otros.

Para tener una idea más clara de la factibilidad del proceso de reciclaje presentado, se estimó el período de recuperación de la inversión (en equipo) mediante cálculos sencillos utilizando la información disponible. Debido a que no se realizaron cálculos más específicos tal como costos de operación e inversión total por encontrarse fuera del alcance del presente trabajo, se procedió a realizar un flujo de caja diferencial comparando el presente proyecto de reciclaje con el proceso de producción de resina virgen. En los ingresos, se tomó en cuenta el ahorro energético que se logró al producir pellets reciclados ( $65 \text{ MJ/kg}$ ). Respecto a los egresos, se consideró el precio de venta menor que caracteriza a los pellets reciclados en comparación con el material de resina virgen. De acuerdo a lo anterior, se realizó el flujo de caja mostrado en la Tabla 42 (página 99), de donde se obtiene que, la inversión en equipo (alrededor de Q90,000,000.00) se recupera en menos de un año (Tabla 14, página 48), lo cual nos da un indicio de la factibilidad del proyecto. Es importante mencionar que el monto recuperado no constituye la inversión total, pues esta última involucra costo de terreno, construcción, mobiliario y equipo de oficina, entre otros. Además, no se realizó una comparación a fondo de los costos de operación (materia prima, insumos, etc.) debido a la falta de dicha información, por lo que es probable que el período de recuperación real sobrepase el valor obtenido. Sin embargo, a pesar de dicha variabilidad en el cálculo, el proyecto presenta un perfil de rentabilidad muy alto.

## IX. CONCLUSIONES

1. De acuerdo a las pruebas experimentales, el método de separación por densidad es una alternativa altamente eficiente para la separación de una mezcla de termoplásticos comunes en las siguientes corrientes: HDPE, PS, mezcla de PET y PVC, mezcla de PP y LDPE rígido.
2. Según las pruebas experimentales de lavado, el pegamento utilizado en la industria guatemalteca para la colocación de etiquetas en contenedores plásticos es un componente poco amigable con el ambiente y no es soluble en soluciones cáusticas.
3. El proceso propuesto en el diagrama de flujo permite la separación y tratamiento de desechos plásticos rígidos post-consumo para obtener como productos, pellets grado poliéster (a partir de PET) y pellets de HDPE y PP, estos dos últimos destinados a la industria de rotomoldeo.
4. Se determinó de acuerdo a los balances de masa que a partir de una capacidad de procesamiento de desechos de 4000 kg/h, se obtienen 1335.75 kg/h de pellets grado poliéster, 953.08 kg/h de pellets de HDPE y 953.08 kg/h de pellets de PP.
5. Se obtuvo que el consumo energético por unidad de masa de producto es de 1.22 kW-h/kg pellets.
6. Debido a la gran cantidad de equipo necesario, la inversión inicial del proyecto es alta: \$1,435,222.84 (Q89,652,147.03).
7. El período de recuperación de la inversión en equipo resultó ser menor a un año, presentando un perfil de rentabilidad muy alto para el presente proyecto de reciclaje.

## X. RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas experimentales para determinar el grado de contaminación real de los desechos recolectados mediante el sistema propuesto en el presente trabajo, a manera de obtener resultados más exactos.
2. Realizar pruebas experimentales de caracterización del material plástico desechado en Guatemala, con el objetivo de determinar la composición por tipo de resina y así conocer de manera más certera la producción esperada de las líneas de reciclaje.
3. Realizar una investigación sobre las características del pegamento utilizado en la industria guatemalteca para la colocación de etiquetas en contenedores plásticos. Además, realizar pruebas experimentales para proponer un método de lavado más eficiente, que logre eliminar la mayor cantidad de pegamento presente en los residuos plásticos.
4. Continuar este trabajo mediante la propuesta de un proyecto de automatización de las etapas de separación y lavado, para garantizar que estas se lleven a cabo de manera eficiente al mantener adecuada y constantemente densidades y temperaturas de las soluciones utilizadas.
5. Plantear nuevas alternativas de aprovechamiento o disposición del material que no forma parte del producto final, así como evaluar la posible implementación de otras opciones tal como la recuperación de energía por incineración de plásticos difícilmente reciclables y venta de metales y aluminio.
6. Proponer como complemento al presente trabajo, un sistema para la recuperación de etanol utilizado en la etapa de separación por densidad de poliolefinas, con el objetivo de disminuir costos de producción y evitar su descarga al ambiente.
7. Realizar un proyecto de investigación sobre las propiedades mecánicas de mezclas de PP y LDPE rígido para determinar la calidad de los productos elaborados a partir de pellets de dicha mezcla.
8. Complementar el presente trabajo con el diseño de una planta de tratamiento basada en las características de la corriente de agua de salida del proceso de reciclaje propuesto. Esto para disminuir el requerimiento de este recurso mediante la recirculación del agua tratada, o para asegurarse de que no se está descargando agua contaminada al ambiente.
9. Desarrollar como complemento al presente proyecto, un proceso de reciclaje de plástico flexible que se lleve a cabo simultáneamente con el procesamiento de plástico rígido propuesto.

10. Realizar una investigación detallada del proceso y tecnología de rotomoldeo, así como del proceso de fabricación de fibra de poliéster a partir de PET post-consumo, para determinar las características y propiedades específicas de la materia prima (pellets de plástico reciclado) que están directamente relacionadas con el proceso de reciclaje de plástico y que se necesitan para obtener productos de calidad.
11. Incluir en el presente diseño los procesos de rotomoldeo y producción de fibra de poliéster, así como un estudio económico de los mismos, a manera de evaluar la posibilidad de integración vertical.
12. Realizar un análisis de marketing para establecer estrategias adecuadas que posicionen y definan el producto reciclado como un artículo de alta calidad y utilidad, además de ser ecológicamente responsable.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Australian Council of Recycling (ACOR). 2003. *Recycling Guide for Fillers Marketing in HDPE*. Recuperado el 28/09/11, de [http://www.nzbcsc.org.nz/\\_attachments/ACOR\\_HDPE\\_Guide.pdf](http://www.nzbcsc.org.nz/_attachments/ACOR_HDPE_Guide.pdf)
2. Barcala, J; *et al.* s.f. *Clasificación automática de envases plásticos*. Recuperado el 10/09/11, de <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIV/documentos/ro/56.pdf>
3. Berho, Matías; Pisoni, Matías. 2007. *Recomendaciones para reciclar, Una introducción al reciclado a gran escala de PET*. Recuperado el 28/09/11, de [http://www.investigacionaccion.com.ar/catedragalan/trabajos/b2ed3a4ee67dad3dac77f249c54d0ebb\\_recomendaciones\\_para\\_reciclar\\_pet.pdf](http://www.investigacionaccion.com.ar/catedragalan/trabajos/b2ed3a4ee67dad3dac77f249c54d0ebb_recomendaciones_para_reciclar_pet.pdf)
4. Brandrup, J. 1996. *Recycling and recovery of plastics*. Alemania. Editorial Hanser Verlag. 893 Pp.
5. Bruno, Edward. s.f. *Automated Sorting of Plastics for Recycling*. Recuperado el 16/10/11, de <http://www.p2pays.org/ref/09/08620.pdf>
6. Casia, Mónica. 2011. *Guía para la preparación y Evaluación de proyectos, con un enfoque administrativo*. Guatemala. Quinta Edición. Editorial Corporación JASD. 137 Pp.
7. Centro Guatemalteco de Producción más Limpia (CGP+L). 2004. *Reportaje Nacional de Manejo de Residuos en Guatemala*. Recuperado el 25/08/11, de [http://www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/desechos/documentos/nac/\(6\)%20PLASTICOS\\_DIVERSOS\\_GUA.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/desechos/documentos/nac/(6)%20PLASTICOS_DIVERSOS_GUA.pdf)
8. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), República de Guatemala. 2011. *Pliegos Tarifarios*. Recuperado el 05/01/12, de <http://www.cnee.gob.gt/Calculadora/index3.php>
9. Doyle, Lawrence; *et al.* 1988. *Materiales y procesos de manufactura para ingenieros*. 3ª ed. México. Editorial Prentice-Hall. 1042 Pp.
10. Environment and Plastics Industry Council (EPIC). s.f. *Plastics Recycling: Building an Infrastructure*. Recuperado el 20/09/11, de [http://www.plastics.ca/\\_files/file.php?fileid=itemPeZhspxEkq&filename=file\\_files\\_Infrastructure.pdf](http://www.plastics.ca/_files/file.php?fileid=itemPeZhspxEkq&filename=file_files_Infrastructure.pdf)

11. Environment and Plastics Industry Council (EPIC). 2006. *A Review Of Optical Technology To Sort Plastic & Other Containers*. Recuperado el 03/10/11, de [http://www.plastics.ca/\\_files/file.php?fileid=itemuLuebOBoAj&filename=file\\_Sorting\\_Mixed\\_Plastics\\_Report\\_Apr06.pdf](http://www.plastics.ca/_files/file.php?fileid=itemuLuebOBoAj&filename=file_Sorting_Mixed_Plastics_Report_Apr06.pdf)
12. European Plastic Converters (EuPC), et al. 2008. *The Compelling Facts About Plastics 2007, An analysis of plastics production, demand and recovery for 2007 in Europe*. Recuperado el 16/08/11, de [http://www.plasticsconverters.eu/uploads/Compelling%20facts%20about%20plastics2008\\_web.pdf](http://www.plasticsconverters.eu/uploads/Compelling%20facts%20about%20plastics2008_web.pdf)
13. European Plastic Converters (EuPC), et al. 2010. *Plastics – the Facts 2010, An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2009*. Recuperado el 10/09/11, de [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20101006091310-final\\_plasticsthefacts\\_28092010\\_lr.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20101006091310-final_plasticsthefacts_28092010_lr.pdf)
14. Garzón, Juan Pablo; et al. s.f. *Planta de reciclaje de plástico*. Recuperado el 25/08/11, de <http://www.ingenieroambiental.com/2060/planta%20de%20reciclado.pdf>
15. Gleick, P. & Cooley H. 2009. *Energy implications of bottled water*. Recuperado el 05/01/12, de [http://iopscience.iop.org/1748-9326/4/1/014009/pdf/1748-9326\\_4\\_1\\_014009.pdf](http://iopscience.iop.org/1748-9326/4/1/014009/pdf/1748-9326_4_1_014009.pdf)
16. Instituto Nacional de Estadística (INE). 2010. *Residuos y desechos sólidos, Anuario estadístico ambiental 2010*. Recuperado el 20/08/11, de <http://www.ine.gob.gt/np/ambientales/index.htm>
17. Jóvenes Socialistas del País Valencia (JSPV). 2010. *Guía de Buenas Prácticas Medioambientales*. Recuperado el 23/07/11, de [http://www.jselx.org/\\_documentos/Guia\\_Buenas\\_Practicas\\_Reciclaje.pdf](http://www.jselx.org/_documentos/Guia_Buenas_Practicas_Reciclaje.pdf)
18. Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven. 2008. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 5ª ed. Editorial Pearson Education. México. 1295 Pp.
19. KWS Design Engineering Manufacturing. 2011. *Screw Conveyor Engineering Guide*. Recuperado el 01/12/11, de <http://www.kwsmfg.com/engineering-guide/p-r-materialtable.htm>
20. McMurry, John. 2004. *Química orgánica*. 6ª ed. México. International Thomson Editores. 1352 Pp.

21. Millán, Enrique. 2003. *Los polímeros en Venezuela*. Recuperado el 25/09/11, de <http://www.saber.ula.ve/eventos/eventos/escuelapolimeros/Sesion%20IV/Pol%EDmeros%20en%20la%20Industria%20Mill%E1n.pdf>
22. Pascoe, R. D. 2000. *Sorting of Waste Plastics for Recycling*. Volumen 11, No. 4, Reporte 124. Editorial iSmithers Rapra Publishing. 109 Pp.
23. Perry, Robert; Green, Don y Maloney, James. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 4ª edición en español. España, Madrid. Editorial McGraw-Hill.
24. PlasticsEurope, Association of Plastics Manufacturers. 2008. *High density polyethylene (HDPE)*. Recuperado el 27/09/11, de [http://www.plasticseurope.org/Documents/Document/20100312112214-FINAL\\_HDPE\\_280409-20081215-017-EN-v1.pdf](http://www.plasticseurope.org/Documents/Document/20100312112214-FINAL_HDPE_280409-20081215-017-EN-v1.pdf)
25. PlasticsEurope, Association of Plastics Manufacturers. 2009. *Los plásticos son demasiado valiosos para desperdiciarlos*. Recuperado el 25/08/11, de [http://plasticseurope.cefic.org/documents/document/20100620171941-plasticstoovaluableto\\_waste\\_2010\\_es\\_low-20100423-015-sp-v1.pdf](http://plasticseurope.cefic.org/documents/document/20100620171941-plasticstoovaluableto_waste_2010_es_low-20100423-015-sp-v1.pdf)
26. Practical Action, The Schumacher Centre for Technology & Development. s.f. *Recycling Plastics*. Recuperado el 28/09/11, de [http://www.itdg.org/docs/technical\\_information\\_service/recycling\\_plastics.pdf](http://www.itdg.org/docs/technical_information_service/recycling_plastics.pdf)
27. Sawyer, Dan. 2009. *New Avenues in Recycling: NIR and Other Technologies Sort PET and Bioresin Bottles*. Recuperado el 27/09/11, de <http://leadwise.mediadroit.com/files/7864Sorting%20White%20paper%2012-15-09-1.pdf>
28. Screw Conveyor Corporation. 2010. *Screw Conveyor Catalog & Engineering Manual*. Recuperado el 01/11/11, de [http://www.screwconveyor.com/SCC%20EngCat10\\_LR.pdf](http://www.screwconveyor.com/SCC%20EngCat10_LR.pdf)
29. Seider, Warren D.; Seader J.D. y Lewin, Daniel R. 2004. *Product & Process Design Principles. Synthesis, Analysis and Evaluation*. 2ª Edición. USA. Editorial Wiley. 736 Pp.
30. Smith; J. M.; Van Ness, H. C. y Abbott, M. M. 2007. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. Séptima edición. India. Editorial McGraw-Hill. 816 Pp.
31. Tall, Stefan. 2000. *Recycling of Mixed Plastic Waste*. Recuperado el 26/10/11, de [https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:0Xsf9PsnEcGJ:kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:8665/FULLTEXT01+Recycling+of+Mixed+Plastic+Waste%E2%80%93+Is+Separation+Worthwhile?&hl=es&gl=gt&pid=bl&srcid=ADGEESigWRgLcxurkvKOSQ5x\\_UuSdvG](https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:0Xsf9PsnEcGJ:kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:8665/FULLTEXT01+Recycling+of+Mixed+Plastic+Waste%E2%80%93+Is+Separation+Worthwhile?&hl=es&gl=gt&pid=bl&srcid=ADGEESigWRgLcxurkvKOSQ5x_UuSdvG)

1-VcpV9vkYNYiStDDKxtipiSDiJ9MqE9o8c8LzmoB0KB8tle2Sb76PKUH6oMTb0taoizl0v  
Flk5lZUfamoiZgsFkeTy7pyaptFOSclejhf9ai&sig=AHIEtbSnpCY-ejM4oWuU\_J336KfHdM  
3JOw&pli=1

32. United Nations Environment Programme (UNEP). 2009. *Converting Waste Plastics into a Resource*. Recuperado el 27/09/11, de [http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/spc/WastePlasticsEST\\_Compndium.pdf](http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/spc/WastePlasticsEST_Compndium.pdf)
33. Vest, Heino. 2000. *Small Scale Recycling of Plastic Waste*. Recuperado el 28/09/11, de [http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/GATE\\_DL/ENV/W10E\\_00.PDF](http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/GATE_DL/ENV/W10E_00.PDF)
34. Vest, Heino. 2003. *Production and Recycling of PET Bottles*. Recuperado el 25/09/11, de [http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/GATE\\_DL/ENV/E018E\\_03.PDF](http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/GATE_DL/ENV/E018E_03.PDF)
35. Vicent, María; Álvarez, Silvia y Zaragoza, José. 2006. *Ciencia y tecnología de polímeros*. España, Valencia. Editorial Universidad Técnica de Valencia. 127 Pp.
36. Virtual European Recycling Centre (VERC). 2005. *Technological Reference Paper on Recycling Plastics*. Recuperado el 03/10/11, de [http://www.wastexchange.co.uk/documenti/H%20Medio\\_Ambiente\\_PROYECTOS\\_Z5008\\_verc\\_clara\\_WP2\\_refpaper\\_Refpaper\\_plastic\\_v2.pdf](http://www.wastexchange.co.uk/documenti/H%20Medio_Ambiente_PROYECTOS_Z5008_verc_clara_WP2_refpaper_Refpaper_plastic_v2.pdf)
37. Wansbrough, Heather; Yuen, David. s.f. *Plastics Recycling*. Recuperado el 13/09/11, de <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/environment/14E.pdf>

## XII. APÉNDICE

### A. Resultados de pruebas experimentales de separación de polímeros por densidad

*Tabla 15. Cantidades de polímeros contenidos en las mezclas a separar mediante diferencias en densidad.*

Material	Masa real contenida en la mezcla ( $\pm 0.0001$ g)		
	Partículas de 10 mm	Partículas de 6 mm	Partículas de tamaño variable
HDPE	6.0090	4.0133	5.0484
PP	3.0102	1.9984	3.0300
LDPE	1.0567	0.7271	1.9775
PVC	3.9704	1.5488	3.0802
PET	2.9250	1.504	3.0696
PS	3.0515	1.2456	4.0123

*Tabla 16. Separación de poliolefinas de no poliolefinas a partir de una mezcla de 6 polímeros termoplásticos (HDPE, PP, LDPE, PVC, PET, PS) mediante sus diferencias en densidad utilizando agua como medio de separación.*

Tamaño de partícula	Material	Masa real dentro de la mezcla ( $\pm 0.0002$ g)	Masa resultante de la separación ( $\pm 0.0001$ g)	Porcentaje de recuperación	Resultados visibles
10 mm	Poliolefinas	10.0759	10.0781	100.0218 $\pm$ 0.0020%	Separación completa
	No poliolefinas	9.9469	9.9193	99.7225 $\pm$ 0.0020%	
6 mm	Poliolefinas	6.7388	6.7385	99.9955 $\pm$ 0.0030%	Contaminaciones muy ligeras
	No poliolefinas	4.2984	4.3070	100.2001 $\pm$ 0.0046%	
Variable	Poliolefinas	10.0559	10.0678	100.1183 $\pm$ 0.0020%	Contaminaciones muy ligeras
	No poliolefinas	10.1621	10.1705	100.0827 $\pm$ 0.0020%	

\*Nota: el grupo de polímeros de baja densidad (poliolefinas) está compuesto por HDPE, PP y LDPE; el grupo de alta densidad (no poliolefinas) comprende PVC, PET y PS.

Tabla 17. Separación de HDPE a partir de una mezcla de 3 polímeros termoplásticos (HDPE, PP, LDPE) mediante sus diferencias en densidad utilizando solución de etanol al 50% v/v como medio de separación.

Tamaño de partícula	Material	Masa real dentro de la mezcla ( $\pm 0.0001$ g)	Masa resultante de la separación ( $\pm 0.0001$ g)	Porcentaje de recuperación	Resultados visibles
10 mm	HDPE	6.0090	5.8885	97.9947 $\pm$ 0.0023%	Contaminaciones muy ligeras
	PP y LDPE	4.0669	4.1864	102.9384 $\pm$ 0.0035%	
6 mm	HDPE	4.0133	3.9748	99.0407 $\pm$ 0.0035%	Separación completa
	PP y LDPE	2.7255	2.726	100.0183 $\pm$ 0.0052%	
Aleatorio	HDPE	5.0484	5.0842	100.7091 $\pm$ 0.0028%	Contaminaciones muy ligeras
	PP y LDPE	5.0075	4.9743	99.3370 $\pm$ 0.0028%	

Tabla 18. Separación de PS a partir de una mezcla de 3 polímeros termoplásticos (PS, PVC, PET) mediante sus diferencias en densidad utilizando solución de NaCl al 25% p/v como medio de separación.

Tamaño de partícula	Material	Masa real dentro de la mezcla ( $\pm 0.0001$ g)	Masa resultante de la separación ( $\pm 0.0001$ g)	Porcentaje de recuperación	Resultados visibles
10 mm	PS	3.0515	2.9537	96.7950 $\pm$ 0.0046%	Contaminaciones muy ligeras
	PVC y PET	6.8954	6.9787	101.2081 $\pm$ 0.0021%	
6 mm	PS	1.2456	1.276	102.4406 $\pm$ 0.0115%	Contaminaciones muy ligeras
	PVC y PET	3.0528	2.9941	98.0772 $\pm$ 0.0046%	
Aleatorio	PS	4.0123	3.9647	98.8136 $\pm$ 0.0035%	Contaminaciones muy ligeras
	PVC y PET	6.1498	6.2481	101.5984 $\pm$ 0.0023%	

Figura 18. Partículas de 10 mm de HDPE (izquierda) y mezcla de LDPE y PP (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.



Figura 19. Partículas de 6 mm de HDPE (izquierda) y mezcla de LDPE y PP (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.



Figura 20. Partículas de tamaño variable de HDPE (izquierda) y mezcla de LDPE y PP (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.

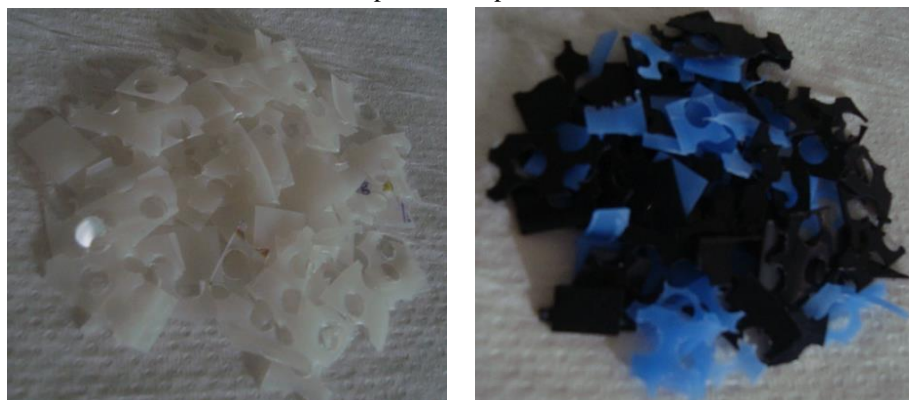


Figura 21. Partículas de 10 mm de PS (izquierda) y mezcla de PET y PVC (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.



Figura 22. Partículas de 6 mm de PS (izquierda) y mezcla de PET y PVC (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.



Figura 23. Partículas de tamaño variable de PS (izquierda) y mezcla de PET y PVC (derecha) obtenidas de las separaciones por densidad.



## B. Resultados cualitativos de pruebas experimentales de lavado de plásticos post-consumo.

En la Tabla 19 se muestran las condiciones en que se llevaron a cabo las pruebas de lavado en caliente. Como se observa, se realizaron procesos de lavado a varias concentraciones de hidróxido de sodio, sin embargo, no se apreciaron diferencias en los resultados.

*Tabla 19. Condiciones de lavado de PET post-consumo y resultados obtenidos.*

Concentración de NaOH (% p/v)	Temperatura de la solución (°C)	Tiempo de lavado (min)	Resultados visuales
0.5	70-75	12	Remoción parcial de goma y restos de etiquetas
2.0			Remoción parcial de goma y restos de etiquetas
5.0			Remoción parcial de goma y restos de etiquetas
15.0			Remoción parcial de goma y restos de etiquetas

Figura 24. Plástico triturado antes (izquierda) y después (derecha) del proceso de lavado realizado a cabo a escala de laboratorio.



### C. Balance de masa

Para realizar el balance de masa del proceso se tomaron en cuenta los datos mostrados en la Tabla 20, los cuales representan la caracterización de la corriente de desechos plásticos post-consumo en sus diferentes tipos de polímeros.

La información presentada en la Tabla 20 comprende una estimación basada en estadísticas de consumo de plásticos para la fabricación de empaque y embalaje en México durante el año 2000. Esto se debe a que la mayor parte de desechos plásticos post-consumo constituyen empaque y embalaje de los diversos productos de vida corta que se encuentran disponibles en la actualidad, por lo que dicha estadística constituyó una buena aproximación tomando en cuenta que no hay disponibles datos reales.

*Tabla 20. Caracterización estimada de la corriente de desechos plásticos rígidos post-consumo.*

<b>Tipo de resina</b>	<b>Porcentaje en la corriente de desechos plásticos</b>
HDPE	24%
PET	37%
PP	20%
PS	10%
PVC	5%
LDPE rígido	4%
Total plásticos desechados	100%

Asimismo, se asumió que la corriente de desechos plásticos post-consumo se encontraba con una baja contaminación de otros materiales debido al sistema de recolección propuesto. Por lo tanto, se tomó en cuenta que de la corriente total recolectada contenía 95% de desechos plásticos y 5% de contaminantes. A continuación, en las Tablas 21, 22 y 23 se muestran los diferentes contaminantes que fueron considerados para realizar el balance de masa y que representan el 5% mencionado, así como los porcentajes finales de los diferentes polímeros en la corriente total recolectada.

*Tabla 21. Características de la corriente total de entrada que se recolecta.*

<b>Material</b>	<b>Porcentaje en la corriente total de entrada</b>
Plásticos rígidos comunes (HDPE, PET, PP, PS, PVC, LDPE) con etiquetas	95.0%
Contaminantes (excepto etiquetas)	5.0%

*Tabla 22. Composición del 95% de plásticos rígidos desechados en la corriente recolectada.*

<b>Material</b>	<b>Porcentaje de composición</b>
Plásticos rígidos comunes (HDPE, PET, PP, PS, PVC, LDPE) sin etiquetas	90.25%
Etiquetas	4.75%

Con base en las últimas tres Tablas (20, 21 y 22), se calculó el porcentaje final en la corriente total de los diferentes materiales considerados (Tabla 23).

*Tabla 23. Desglose de la composición final en la corriente total de desechos.*

<b>Material</b>	<b>Porcentaje de composición</b>
HDPE	21.7%
PET	33.4%
PP	18.1%
PS	9.0%
PVC	4.5%
LDPE rígido	3.6%
Etiquetas	4.8%
Metales	0.5%
Aluminio	1.0%
Papel y cartón	1.0%
Piedras	0.25%
Plástico flexible	1.0%
Plásticos rígidos difícilmente reciclables	1.0%
Otros contaminantes	0.25%
<b>TOTAL</b>	<b>100.0%</b>

Los balances de masa globales y en cada etapa se realizaron a partir de la Tabla 23 y de la capacidad de la línea de reciclaje (flujo másico de desechos procesados). Para determinar la capacidad de la línea se realizó previamente un estimado de la cantidad de residuos plásticos post-consumo generados en Guatemala. La estimación mencionada se realizó tomando en cuenta los datos más recientes de generación de desechos sólidos domiciliarios en Guatemala (2009), los cuales están disponibles en la página Web del Instituto Nacional de Estadística (INE). Además, se tomó en cuenta que los residuos plásticos representan el 8% en peso de los residuos sólidos totales (tal como se menciona en el marco teórico). A continuación se presentan los resultados obtenidos para el cálculo mencionado:

*Tabla 24. Estimación de la generación de desechos plásticos en Guatemala.*

Residuos sólidos domiciliarios en Guatemala durante el año 2009 (ton/año)	1746059
Porcentaje en masa de plásticos en los residuos sólidos urbanos (%)	8
Desechos plásticos generados (ton/año)	139684.72
Desechos plásticos generados (kg/año)	139684720
Desechos plásticos generados (kg/h)	15945.74

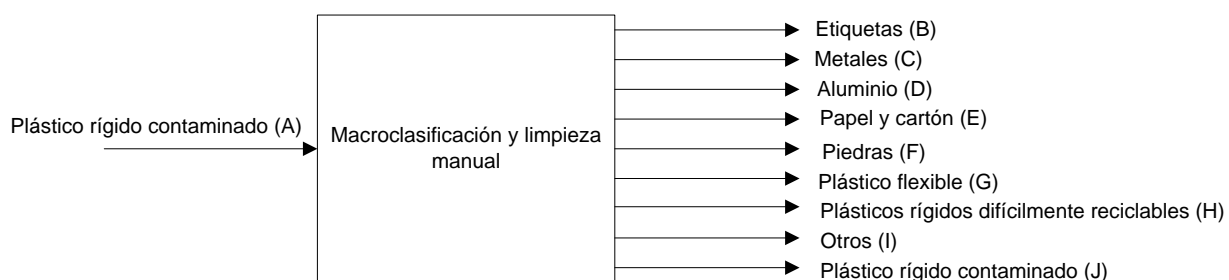
De acuerdo a la estimación anterior, cada hora se generan 15,945.74 kg de plásticos de desecho en toda Guatemala. Tomando en cuenta esta información, se decidió considerar solamente una parte de los desechos generados, como materia prima para el funcionamiento de la línea de reciclaje propuesta, esto se debe a que no todos los desechos son plásticos rígidos en los cuales se tiene interés. Por lo tanto, se decidió procesar 4000 kg/h de desechos plásticos. Además, se consideró trabajar 24 horas al día y 330 días a la semana, esto debido a días de paro necesarios para realizar mantenimiento. Teniendo en cuenta lo anterior se procedió a realizar los cálculos correspondientes al balance de masa en cada etapa, tal como se muestra seguidamente.

**1. Balance de masa en cada etapa del proceso.** Los balances de masa en cada etapa del proceso son indispensables para el posterior dimensionamiento del equipo. Para esto se analizan las etapas de manera individual, partiendo de la capacidad de procesamiento de desechos determinada anteriormente (4000 kg/h de desechos plásticos). A continuación se presenta el

balance de masa de la primer etapa: macroclasificación y limpieza manual. No se muestran los balances para las etapas restantes ya que éstos se realizan de manera similar a la mostrada.

#### a. Macroclasificación y limpieza manual

Figura 25. Diagrama de entradas y salidas en la primera etapa del proceso.



De acuerdo a los porcentajes de la Tabla 23 (página 69), se sabe que la composición específica para la entrada de 4000 kg/h de desechos es la siguiente:

Tabla 25. Composición másica de la corriente de entrada.

Material	Masa (kg/h)
HDPE	866.40
PET	1335.70
PP	722.00
PS	361.00
PVC	180.50
LDPE rígido	144.40
Etiquetas	190.00
Metales	20.00
Aluminio	40.00
Papel y cartón	40.00
Piedras	10.00
Plástico flexible	40.00
Plásticos rígidos difícilmente reciclables	40.00
Otros contaminantes	10.00

En la clasificación manual se debe eliminar la totalidad de piedras, plástico flexible, plásticos rígidos difícilmente reciclables y otros contaminantes. Además, se elimina parte de etiquetas (sueltas), metales, aluminio, papel y cartón. Asumiendo que se elimina el 1% de las etiquetas, metales y aluminio, y además se elimina el 10% del papel y cartón, las corrientes de salida son:

- Piedras = 10.00 kg/s
- Plástico flexible = 40.00 kg/h
- Plásticos rígidos difícilmente reciclables = 40.00 kg/h
- Otros = 10.00 kg/s
- Etiquetas =  $0.01 \cdot (190.00 \text{ kg/h}) = 1.90 \text{ kg/h}$
- Metales =  $0.01 \cdot (20.00 \text{ kg/h}) = 0.20 \text{ kg/h}$
- Aluminio =  $0.01 \cdot (40.00 \text{ kg/h}) = 0.40 \text{ kg/h}$
- Papel y cartón =  $0.1 \cdot (40.00 \text{ kg/h}) = 4.00 \text{ kg/h}$

Debido a que:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$A = B + C + D + E + F + G + H + I + J$$

$$J = A - (B + C + D + E + F + G + H + I)$$

$$\text{Plásticos rígidos contaminados de salida} = 4000 \text{ kg/h} - (10+40+40+10+1.90+0.2+0.4+4) \text{ kg/h}$$

$$\text{Plásticos rígidos contaminados de salida} = 3893.50 \text{ kg/h}$$

Por lo tanto, a la salida de la etapa de macroclasificación y limpieza manual, se extrae una parte de contaminantes, y la corriente de plásticos que aún contiene contaminantes (en menor cantidad en comparación a la entrada) pasa a la siguiente etapa del proceso.

Realizando cálculos similares se realizaron los balances para cada etapa. Los resultados de dichos balances se muestran en las tablas siguientes.

Tabla 26. Balance de masa en las etapas de la primera parte del proceso.

No. Etapa	Etapa del proceso	Entrada (kg/h)	Salida (kg/h)
E-1	<i>Macroclasificación y limpieza manual</i>	Plástico rígido contaminado 4000	Etiquetas 1.90 Metales 0.20 Aluminio 0.40 Papel y cartón 4.00 Piedras 10.00 Plástico flexible 40.00 Plásticos rígidos 40.00 Otros 10.00 Plástico rígido contaminado E1 3893.50
E-2	<i>Separación ferromagnética</i>	Plástico rígido contaminado E1 3893.50	Metales 19.80 Plástico rígido contaminado E2 3873.70
E-3	<i>Separación de no férricos (Eddy Current)</i>	Plástico rígido contaminado E2 3873.70	Aluminio 39.60 Plástico rígido contaminado E3 3834.10
E-4	<i>Separación con tecnología rayos-X</i>	Plástico rígido contaminado E3 3834.10	PVC 171.48 Plástico rígido contaminado E4 3662.63
E-5	<i>Embalaje</i>	Plástico rígido contaminado E4 3662.63	Plástico rígido contaminado E4 3662.63
E-6	<i>Desembalaje</i>	Plástico rígido contaminado E4 3662.63	Plástico rígido contaminado E4 3662.63
E-7	<i>Molienda</i>	Plástico rígido contaminado E4 3662.63	Escamas de plástico mixto contaminado 3662.63
E-8	<i>Separación de partículas ligeras (Air classifier)</i>	Escamas de plástico mixto contaminado 3662.63	Etiquetas 188.10 Papel y cartón 36.00 Escamas de plástico mixto sin contaminantes 3438.53
E-9	<i>Separación de poliolefinas y no poliolefinas</i>	Escamas de plástico mixto sin contaminantes 3438.53 Agua 24532.68	Escamas húmedas de poliolefinas 2475.43 Escamas húmedas de no poliolefinas 2436.75 Agua contaminada 23059.03

Tabla 27. Balance de masa en las etapas correspondientes al procesamiento de PET.

No. Etapa	Etapas del proceso	Entrada (kg/h)	Salida (kg/h)		
E-10 <sup>a</sup>	<i>Separación por densidad con solución salina</i>	Escamas húmedas de no poliolefinas	2436.75	Escamas húmedas de PET y trazas de PVC	1921.04
		Solución salina al 25% p/v	14434.49	Escamas húmedas de PS	515.71
		Solución salina al 25% p/v:		Solución salina al 25% p/v	14434.49
		Agua	11237.96		
		NaCl	3196.52		
E-11A.1	<i>Lavado en caliente fase 1</i>	Escamas húmedas de PET y trazas de PVC	1921.04	Escamas húmedas de PET y trazas de PVC	1921.04
		Solución NaOH al 0.5% p/v	2878.24	Solución NaOH al 0.5% p/v	2878.24
		Solución NaOH al 0.5% p/v:			
		Agua	2860.97		
		NaOH	17.27		
E-11A.2	<i>Lavado con detergente fase 2</i>	Escamas húmedas de PET y trazas de PVC	1921.04	Escamas húmedas de PET y trazas de PVC	1921.04
		Solución de lavado con detergente (0.5% p/v)	2878.24	Solución de lavado con detergente (0.5% p/v):	2878.24
		Solución de lavado con detergente (0.5% p/v):			
		Agua	2860.97		
		Detergente	17.27		
E-11A.3	<i>Enjuague final fase 3</i>	Escamas húmedas de PET y trazas de PVC	1921.04	Escamas húmedas de PET y trazas de PVC	1921.04
		Agua	2878.24	Agua y restos de detergente	2878.24
E-12 <sup>a</sup>	<i>Secado mecánico</i>	Escamas húmedas de PET y trazas de PVC (30% HR)	1921.04	Escamas de PET y trazas de PVC (0.7% HR)	1354.20
				Agua	566.83
E-13 <sup>a</sup>	<i>Secado térmico</i>	Escamas de PET y trazas de PVC (0.7% HR)	1354.20	Escamas secas de PET y trazas de PVC (0.004% HR $\approx$ 50 ppm)	1344.78
		Aire seco	2688.91	Aire húmedo	2698.33
E-14 <sup>a</sup>	<i>Separación electrostática de PET y PVC</i>	Escamas secas de PET y trazas de PVC	1344.78	Escamas de PET limpias y secas	1335.75
				Escamas de PVC limpias y secas	9.03
E-15 <sup>a</sup>	<i>Extrusión y peletizado de gránulos poliéster</i>	Escamas de PET limpias y secas	1335.75	Pellets grado poliéster	1335.75

Tabla 28. Balance de masa en las etapas correspondientes al tratamiento de poliolefinas.

No. etapa	Etapas del proceso	Entrada (kg/h)	Salida (kg/h)		
E-10B.1	<i>Lavado en caliente fase 1</i>	Escamas húmedas de poliolefinas	2475.43	Escamas húmedas de poliolefinas	2475.43
		Solución NaOH al 0.5% p/v	3708.88	Solución NaOH al 0.5% p/v	3708.88
		Solución NaOH al 0.5% p/v:			
		Agua	3686.62		
		NaOH	22.26		
E-10B.2	<i>Lavado con detergente fase 2</i>	Escamas húmedas de poliolefinas	2475.43	Escamas húmedas de poliolefinas	2475.43
		Solución de lavado con detergente (0.5% p/v):	3708.88	Solución de lavado con detergente (0.5% p/v):	3708.88
		Solución de lavado con detergente (0.5% p/v):			
		Agua	3686.62		
		Detergente	22.26		
E-10B.3	<i>Enjuague final fase 3</i>	Escamas húmedas de poliolefinas	2475.43	Escamas húmedas de poliolefinas	2475.43
		Agua	3708.88	Agua y restos de detergente	3708.88
E-11B	<i>Separación por densidad con solución de etanol</i>	Escamas húmedas de poliolefinas	2475.43	Escamas húmedas de HDPE	1237.71
		Solución Et-OH al 50% v/v	11497.52	Escamas húmedas de PP y LDPE	1237.71
		Solución Et-OH al 50% v/v:		Solución Et-OH al 50% v/v	11497.52
		Agua	6331.26		
		Et-OH	5166.26		

Tabla 29. Balance de masa en las etapas correspondientes al procesamiento de HDPE.

No. etapa	Etapas del proceso	Entrada (kg/h)		Salida (kg/h)	
E-12BA	<i>Secado mecánico</i>	Escamas húmedas de HDPE (30% HR)	1237.71	Escamas de HDPE (0.7% HR)	872.51
				Agua	365.21
E-13BA	<i>Secado térmico</i>	Escamas de HDPE (0.7% HR)	872.51	Escamas húmedas de HDPE (0.004% HR $\approx$ 50 ppm)	866.43
		Aire seco	1732.45	Aire húmedo	1738.52
E-14BA	<i>Mezclador</i>	Escamas limpias y secas de HDPE	866.43	Escamas limpias y secas de HDPE con pigmento	953.08
		Pigmento negro	86.64		
E-15BA	<i>Extrusión y peletizado</i>	Escamas limpias y secas de HDPE con pigmento	953.08	Pellets coloreados de HDPE	953.08

Tabla 30. Balance de masa en las etapas correspondientes al procesamiento de PP.

No. etapa	Etapas del proceso	Entrada (kg/h)		Salida (kg/h)	
E-12BB	<i>Secado mecánico</i>	Escamas húmedas de PP y LDPE (30% HR)	1237.71	Escamas de PP y LDPE (0.7% HR)	872.51
				Agua	365.21
E-13BB	<i>Secado térmico</i>	Escamas de PP y LDPE (0.7% HR)	872.51	Escamas secas de PP y LDPE (0.004% HR $\approx$ 50 ppm)	866.43
		Aire seco	1732.45	Aire húmedo	1738.52
E-14BB	<i>Mezclador</i>	Escamas limpias y secas de PP y LDPE	866.43	Escamas limpias y secas de PP y LDPE con pigmento	953.08
		Pigmento	86.64		
E-15BB	<i>Extrusión y peletizado</i>	Escamas limpias y secas de PP y LDPE	953.08	Pellets coloreados de mezcla de PP y LDPE	953.08

**2. Balance global de masa.** Tomando en cuenta los balances en cada etapa del proceso que se muestran con anterioridad, el balance general o global de la línea completa se resume en la tabla a continuación. Los valores presentados en el balance global se calcularon sumando las entradas y salidas de cada fase del proceso para determinar entradas y salidas del proceso en conjunto.

*Tabla 31. Balance global de masa en la línea de procesamiento de residuos plásticos.*

<b>ENTRADA</b>		<b>SALIDA</b>	
<b>Material</b>	<b>Masa (kg/h)</b>	<b>Material</b>	<b>Masa (kg/h)</b>
Plástico rígido contaminado	4000.00	Pellets grado poliéster	1335.75
Pigmento negro	173.29	Pellets de HDPE para uso en rotomoldeo	953.08
Agua	3166.47	Pellets de PP y un pequeño porcentaje de LDPE para uso en rotomoldeo	953.08
NaCl	349.95	PVC (recipientes enteros y material triturado)	180.50
Et-OH	216.19	PS triturado (30% HR)	515.71
NaOH	16.48	Etiquetas	190.00
Detergente	16.48	Metales	20.00
Aire seco	6153.81	Aluminio	40.00
		Papel y cartón	40.00
		Piedras	10.00
		Plástico flexible	40.00
		Plásticos rígidos difícilmente reciclables	40.00
		Otros contaminantes	10.00
		Agua contaminada (NaCl, CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH, NaOH, detergente y suciedad en solución)	4271.20
		Aire húmedo	3589.16
<b>Total entrada</b>	<b>14092.67</b>	<b>Total salida</b>	<b>14092.67</b>

De acuerdo a la tabla anterior, la producción anual de los tres productos finales (pellets para producción de fibra poliéster, pellets de HDPE y PP para rotomoldeo) se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 32. Producción anual para su posterior procesamiento en la industria manufacturera de productos plásticos.

Producto final	Masa (kg/año)	Masa (ton/año)
Pellets grado poliéster	10579167.17	10579.17
Pellets de HDPE para uso en rotomoldeo	7548378.74	7548.38
Pellets de PP y un pequeño porcentaje de LDPE para uso en rotomoldeo	7548378.74	7548.38

## D. Dimensionamiento de equipo

**1. Tanques.** Para determinar el volumen del tanque de separación de la corriente principal de plásticos, se utilizó la densidad aparente de plástico triturado que fue medida experimentalmente y cuyo valor resultante es de  $1401.61 \text{ kg/m}^3$ .

- Plástico triturado que se requiere alimentar en el tanque de separación: 3438.53 kg/h
- Tipo de operación: batch
- Tiempo de la operación (separación): 0.5 h
- Masa de plástico a tratar por batch: 1719.26 kg

$$V = m/\rho \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{Volumen de plástico triturado por batch} = 1719.26 \text{ kg} * \frac{\text{m}^3}{1401.61 \text{ kg}} = 1.227 \text{ m}^3$$

- Volumen del medio de separación (agua): 10 veces el volumen de plástico a tratar

$$\text{Volumen de agua} = 1.227 \text{ m}^3 * 10 = 12.27 \text{ m}^3$$

Tomando en cuenta el factor de seguridad de 1.25, el volumen del tanque de separación es el siguiente:

$$V_{\text{tanque}} = (\text{volumen plástico} + \text{volumen medio de separación}) * \text{factor de seguridad} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$V_{\text{tanque}} = (1.227 \text{ m}^3 + 12.27 \text{ m}^3) * 1.25 = 16.87 \text{ m}^3$$

Se realizó un procedimiento similar para calcular el volumen de todos los tanques utilizados en el proceso.

**2. Transportadores de tornillo.** Las dimensiones de los transportadores de tornillo fueron estimadas a partir de las Tablas 43 y 44 (páginas 100 y 101), que son parte de un manual ingenieril proporcionado en un catálogo de equipo para transportadores de tornillo.

El primero paso a seguir es clasificar el material que se va a transportar. De acuerdo a la Tabla 43 (página 100), las escamas de plástico triturado corresponden al código D25 (material granular que fluye libremente y no es abrasivo). El segundo paso es utilizar el código del material y su flujo volumétrico para determinar el diámetro necesario del tornillo con el cuadro mostrado en la Tabla 44 (página 101). A continuación se realizará este procedimiento para el transportador de tornillo del tanque de separación de la corriente principal de plásticos.

- Flujo másico de no poliolefinas a transportar: 2436.75 kg/h
- Densidad aparente: 1401.61 kg/m<sup>3</sup>
- Factor de seguridad: 1.25

$$\text{Flujo volumétrico a transportar} = 2436.75 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{\text{m}^3}{1401.61 \text{ kg}} * \left( \frac{3.2808 \text{ pie}}{1 \text{ m}} \right)^3 * 1.25$$

$$\text{Flujo volumétrico a transportar} = 76.74 \frac{\text{pie}^3}{\text{h}}$$

Según la Tabla 44 (página 101), para material de la clase D25 (material no abrasivo 30%A), un transportador de tornillo de 6” de diámetro es capaz de transportar 180 pies<sup>3</sup>/h a la máxima velocidad recomendada (120 rpm). Por lo tanto, un tornillo de 6” de diámetro cumple con la capacidad requerida de 76.74 pies<sup>3</sup>/h.

De acuerdo al manual ingenieril para calcular tornillos, la velocidad requerida está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{velocidad requerida (rpm)} = \frac{\text{capacidad requerida (pie}^3/\text{h)}}{\text{capacidad a 1 rpm (pie}^3/\text{h)}}$$

(Ec. 3) (Screw Conveyor Corporation, 2010)

$$\text{velocidad requerida} = \frac{76.74 \text{ pie}^3/\text{h}}{1.49 \text{ pie}^3/\text{h}} = 51.50 \text{ rpm} \cong 52 \text{ rpm}$$

Respecto a la longitud de transporte, debe ser establecida en cada caso, según sea necesario, para llevar el material de un equipo a otro. En este caso se debe transportar las no poliolefinas separadas, desde el tanque hacia otro tanque de separación con solución salina. Sin

embargo, como no se sabe con exactitud las dimensiones específicas de los equipos (tanques) y la posición del tornillo en el tanque, se asumió para todos los tornillos, una longitud de 25 pies.

Ahora bien, para calcular la potencia necesaria (en hp) para los motores de los transportadores, se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$H = \frac{L(DS + QF)}{1000000}$$

(Ec. 4) (Screw Conveyor Corporation, 2010)

Donde:

L = longitud del transportador (pies)

D = factor “D” mostrado en la Tabla 45 (página 102)

S = velocidad (rpm)

Q = flujo de material a transportar (lb/h)

F = factor de caballos de fuerza mostrado en la Tabla 46 (página 102)

$$\text{Potencia del motor} = (H * P)/0.9$$

(Ec. 5) (Screw Conveyor Corporation, 2010)

Donde:

P = 2 cuando  $H < 1$

P = 1.5 cuando  $1 < H < 2$

P = 1.25 cuando  $2 < H < 4$

P = 1.1 cuando  $4 < H < 5$

P = 1 cuando  $H > 5$

A continuación se calculará la potencia del motor que necesita el transportador de tornillo del tanque de separación de la corriente principal de plásticos.

- L = 25 pies
- D = 80, para un tamaño de transportador de 6” de diámetro y tomando en cuenta el mayor valor posible de las opciones mostradas en la Tabla 45 (página 102).
- S = 52 rpm
- Q = 5372.02 lb/h (2436.75 kg/h)

Tomando en cuenta que no se encuentra disponible el plástico triturado o escamas de plástico en la tabla de materiales (Tabla 46, página 102), se tomó como referencia los pellets de PVC y pellets de PE, para estimar el valor del factor F como sigue:

$$- F = 1$$

$$H = \frac{(25)[(80 * 52) + (5372.02 * 1)]}{1000000} = 0.2383$$

Por lo tanto,  $P = 2$  y la potencia mínima recomendada para el motor del transportador de tornillo es la siguiente:

$$Potencia\ del\ motor = \frac{(0.2383 * 2)}{0.9} = 0.53$$

Sin embargo, por motivos de seguridad se colocará un motor de 2.5 hp, cuyo valor debe corroborarse con la Tabla 47 (página 103), donde se muestra la máxima potencia posible. La última tabla indica que la máxima potencia para este caso es de 3.75 hp, por lo que los 2.5 hp establecidos no sobrepasan dicho valor y pueden ser aplicados.

Se realizó un procedimiento similar para calcular las dimensiones y potencia de todos los transportadores de tornillo utilizados en el proceso.

**3. Potencia de calentadores necesarios para tanques de lavado a altas temperaturas.** A continuación se muestra el cálculo de la potencia del calentador para el tanque de lavado en caliente de PET. El cálculo de la potencia del calentador para el tanque de lavado de poliolefinas se calcula de manera similar.

$$Potencia\ (kW) = \frac{Q\ (kJ)}{t\ (s)} \quad (Ec. 6)$$

$$Q = mC_p(T_2 - T_1) \quad (Ec. 7)$$

Donde:

Q = calor latente para elevar la temperatura de la solución desde  $T_1$  hasta  $T_2$

m = masa de solución calentar

$C_p$  = capacidad calorífica solución

$T_1$  = Temperatura inicial de la solución

$T_2$  = Temperatura final de la solución

$t$  = tiempo de calentamiento de la solución

De acuerdo al balance de masa se tiene lo siguiente:

- $m = 1439.12$  kg sol NaOH
- $C_p \approx$  capacidad calorífica del agua (solución diluida de NaOH) =  $4.184$  kJ/kg°C
- $T_1 = 25$  °C
- $T_2 = 60$  °C
- $t = 0.5$  h =  $1800$  s

$$Potencia = \frac{(1439.12 \text{ kg}) \left( 4.184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right) (60 - 25)^\circ\text{C}}{1800 \text{ s}} = 117.08 \text{ kW}$$

Tomando en cuenta el factor de seguridad de 1.25, se determina que la potencia requerida para el calentador es:

$$Potencia \text{ (kW)} = 117.08 \text{ kW} * 1.25 = 146.35 \text{ kW} \approx 150 \text{ kW}$$

**4. Potencia requerida por el compresor.** Para determinar la potencia requerida por el compresor se hará uso de las siguientes ecuaciones:

$$W_S = \frac{W_S(\text{isentrópico})}{\eta} \quad (\text{Ec. 8}) \text{ (Smith, 2007)}$$

$$W_S(\text{isentrópico}) = C_p T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{R/C_p} - 1 \right] \quad (\text{Ec. 9}) \text{ (Smith, 2007)}$$

$$T_2' = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{R/C_p} \quad (\text{Ec. 10}) \text{ (Smith, 2007)}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_2' - T_1}{\eta} \quad (\text{Ec. 11}) \text{ (Smith, 2007)}$$

$$P = W_S * \dot{n} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

$W_S$  = trabajo real en un proceso de compresión

$\eta$  = eficiencia de compresión  $\approx 0.7-0.8$

$W_S$  (isentrópico) = trabajo isentrópico en un proceso de compresión

$C_p$  = capacidad calorífica constante del gas ideal

$T_1$  = temperatura inicial del gas a comprimir

$T_2$  = temperatura final del gas comprimido

$P_2$  = presión final del gas en el proceso de compresión

$P_1$  = presión inicial del gas a comprimir

$R$  = constante universal de los gases

$P$  = potencia requerida por el compresor

$\dot{n}$  = flujo molar de gas

Los datos utilizados para el presente cálculo son:

- Gas = aire
- $\eta \approx 0.7$
- $C_{p, \text{aire}} (25^\circ\text{C}) = 29.17 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$  (varía poco con la temperatura por lo que se puede asumir que la capacidad calorífica es constante para el aire)
- $T_1 = 298.15 \text{ K} (25^\circ\text{C})$
- $P_1 = 14.7 \text{ psi} (101.325 \text{ kPa})$

El único equipo que indica en sus especificaciones que necesita aire comprimido es el VinylCycle (90 psi), sin embargo es posible que otros equipos (por ejemplo el separador electrostático) también lo necesiten aunque no lo indiquen. Dado que no se tiene la información sobre la presión requerida para el aire en otros equipos, se realizará una sobreestimación tomando como base las especificaciones del VinylCycle. Por lo tanto:

- $P_2 = 100 \text{ psi}$
- $R/C_p \approx 2/7$  para gases diatómicos como  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  y aire a temperaturas moderadas

$$W_S(\text{isentrópico}) = \left(29.17 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}\cdot\text{K}}\right) (298.15 \text{ K}) \left[ \left(\frac{100 \text{ psi}}{14.7 \text{ psi}}\right)^{2/7} - 1 \right] = 6344.93 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

$$W_s = \frac{6344.93 \frac{kJ}{kmol}}{0.7} = 9064.19 \frac{kJ}{kmol}$$

$$T_2' = (298.15 K) \left( \frac{100 \text{ psi}}{14.7 \text{ psi}} \right)^{2/7} = 515.64 K$$

$$T_2 = 298.15 K + \frac{515.64 K - 298.15 K}{0.7} = 608.84 K$$

Ahora, para determinar el flujo molar de aire se requieren los siguientes datos:

- Flujo de aire requerido por el VinylCycle (flujo de salida del compresor): 60 SCFM
- Volumen molar estándar de un gas: 22.4 m<sup>3</sup>/kmol (P atm y 0°C)

Los dos datos anteriores se corrigen de acuerdo a las condiciones del aire de salida del compresor, de la siguiente manera:

$$\text{Flujo volumétrico real de salida} = 60 \text{ SCFM} * \frac{608.84 K}{273.15 K} * \frac{14.7 \text{ psi}}{100 \text{ psi}} = 19.66 \text{ CFM}$$

$$19.66 \text{ CFM} = 19.66 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}} * \left( \frac{1 \text{ m}}{3.2808 \text{ pie}} \right)^3 * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0.0093 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{s}}$$

El flujo volumétrico de aire se sobredimensionará debido a que, como se mencionó, otros equipos pueden hacer uso de aire comprimido, o éste puede utilizarse para limpieza de los mismos. Por lo que, el flujo se triplicará por seguridad.

$$\text{Flujo volumétrico total de aire requerido} = 0.0093 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 3 = 0.0278 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{Volumen molar de aire a la salida} = 22.4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} * \frac{608.84 K}{273.15 K} * \frac{14.7 \text{ psi}}{100 \text{ psi}} = 7.34 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$$

$$\dot{n} = 0.0278 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{1 \text{ kmol}}{7.34 \text{ m}^3} = 0.0038 \frac{\text{kmol}}{\text{s}}$$

$$P = \left( 9064.19 \frac{kJ}{kmol} \right) \left( 0.0038 \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \right) = 34.37 \text{ kW} \approx 35 \text{ kW}$$

**5. Otros equipos.** El dimensionamiento del resto de equipos se realizó en base a los balances de masa en cada etapa del proceso. Para la mayoría de equipo solamente se necesitó conocer el flujo másico (o masa, en caso de tratarse de un proceso batch) de entrada, sin embargo para otros se necesitaron parámetros como los que se indican en los cálculos anteriores.

**6. Datos calculados en el dimensionamiento de los equipos.** En la tabla a continuación se muestra la especificación principal de diseño para todos los equipos. En los datos mostrados se consideró un factor de seguridad de 1.25 (a excepción del compresor), sobredimensionando el equipo para garantizar que su capacidad cumpla con las requisiciones.

*Tabla 33. Capacidades de diseño del equipo requerido en el proceso.*

Cantidad	Equipo	Tipo de proceso	Capacidad		Tiempo de la operación batch		Especificación de diseño (factor de seguridad =1.25)	
3	Banda transportadora para la etapa de clasificación manual	Continuo	4000	kg/h	---		---	
7	Bandas para transporte durante otras etapas del proceso	Continuo	3438.53	kg/h	---		---	
1	Separador ferromagnético	Continuo	3893.50	kg/h	---		4866.88	kg/h
1	Separador Eddy Current	Continuo	3873.70	kg/h	---		4842.13	kg/h
1	Separador de rayos-X (VynylCicle)	Continuo	3834.10	kg/h	---		4792.63	kg/h
1	Embaladora	Continuo	3662.63	kg/h	---		4578.28	kg/h
2	Debaladora	Continuo	3662.63	kg/h	---		4578.28	kg/h
1	Molino de cuchillas	Continuo	3662.63	kg/h	---		4578.28	kg/h
1	Air classifier	Continuo	3662.63	kg/h	---		4578.28	kg/h
1	Tanque de separación de corriente principal de plásticos	Batch	1719.26	Kg	30	Min	16.87	m <sup>3</sup>
1	Tanque separación de no poliolefinas con solución salina	Batch	1218.38	Kg	30	Min	8.69	m <sup>3</sup>
1	Tanque separación de poliolefinas con solución CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	Batch	1237.71	Kg	30	Min	8.83	m <sup>3</sup>
1	Tanque de lavado en caliente PET y trazas de PVC	Batch	960.52	Kg	30	Min	2.66	m <sup>3</sup>
1	Tanque de lavado en caliente poliolefinas	Batch	1237.71	Kg	30	Min	3.42	m <sup>3</sup>
1	Tanque de lavado con detergente PET y trazas de PVC	Batch	960.52	Kg	30	Min	2.66	m <sup>3</sup>
1	Tanque de lavado con detergente poliolefinas	Batch	1237.71	Kg	30	Min	3.42	m <sup>3</sup>
1	Tanque de enjuague PET y trazas de PVC	Batch	960.52	Kg	30	Min	2.66	m <sup>3</sup>
1	Tanque de enjuague poliolefinas	Batch	1237.71	Kg	30	Min	3.42	m <sup>3</sup>
1	Secador centrífugo línea de PET	Continuo	1921.04	kg/h	---		2401.29	kg/h

Continuación tabla 33.

Cantidad	Equipo	Tipo de proceso	Capacidad		Tiempo de la operación batch		Especificación de diseño (factor de seguridad =1.25)	
2	Secador centrífugo líneas de poliolefinas	Continuo	1237.71	kg/h	---	---	1547.14	kg/h
1	Secador térmico línea de PET	Continuo	1354.20	kg/h	---	---	1692.76	kg/h
2	Secador térmico líneas de poliolefinas	Continuo	872.51	kg/h	---	---	1090.63	kg/h
1	Separador electrostático de PVC	Continuo	1344.78	kg/h	---	---	1680.97	kg/h
1	Extrusor y peletizado línea de PET	Continuo	1335.75	kg/h	---	---	1669.69	kg/h
2	Extrusor y peletizado líneas de poliolefinas	Continuo	953.08	kg/h	---	---	1191.35	kg/h
2	Mezcladores para líneas de poliolefinas	Batch	953.08	Kg	1	H	30.02	ft <sup>3</sup>
1	Transportador de tornillo para tanque de separación con agua	Continuo	2436.75	kg/h	---	---	76.74	ft <sup>3</sup> /h
1	Transportador de tornillo para tanque de separación con solución salina	Continuo	1921.04	kg/h	---	---	60.50	ft <sup>3</sup> /h
1	Transportador de tornillo para tanque de separación con solución de etanol	Continuo	1237.71	kg/h	---	---	38.98	ft <sup>3</sup> /h
3	Transportador de tornillo para tanques de lavado de PET	Continuo	1921.04	kg/h	---	---	60.50	ft <sup>3</sup> /h
1	Transportador de tornillo a la salida de secado térmico de PET	Continuo	1344.78	kg/h	---	---	42.35	ft <sup>3</sup> /h
1	Transportador de tornillo a la salida de separación electrostática de PVC	Continuo	1335.75	kg/h	---	---	42.07	ft <sup>3</sup> /h
1	Transportador de tornillo a la salida molino hacia air classifier	Continuo	3662.63	kg/h	---	---	115.35	ft <sup>3</sup> /h
2	Transportador de tornillo a la salida de secado térmico hacia mezcladores de poliolefinas	Continuo	866.43	kg/h	---	---	27.29	ft <sup>3</sup> /h
2	Transportador de tornillo a la salida de secado mecánico hacia secado térmico de poliolefinas	Continuo	872.51	kg/h	---	---	27.48	ft <sup>3</sup> /h
1	Transportador de tornillo a la salida de secado mecánico hacia secado térmico de PET	Continuo	1354.20	kg/h	---	---	42.65	ft <sup>3</sup> /h
1	Calentador eléctrico para tanque de lavado de PET	Continuo	---	---	---	---	150	kW
1	Calentador eléctrico para tanque de lavado de poliolefinas	Continuo	---	---	---	---	100	kW
1	Compresor	Continuo	0.0038	kmol aire/s	---	---	35	kW

Para la mayoría de equipos, a partir de la especificación principal mostrada en la tabla anterior fue posible consultar catálogos en donde se determinó el resto de especificaciones que se presentan en la sección de resultados (Tabla 12, páginas 42-47). Para otros, fue suficiente conocer solamente los datos que se pudieron calcular en la presente sección.

### E. Balance de energía

Para determinar el consumo energético se tomó en cuenta la potencia de cada equipo utilizado, valores que se indican en las especificaciones técnicas mostradas en la sección de resultados. Cabe mencionar que el consumo energético se atribuye solamente a consumo de electricidad, ya que no se proporciona energía en forma de calor en ninguna etapa del proceso. En la tabla a continuación se presenta la potencia unitaria por cada uno de los equipos, la potencia total por el número de equipos utilizados, así como la energía total consumida en kW-h/día.

Tabla 34. Consumo energético por equipo.

Cantidad	Equipo	Potencia por equipo (kW)	Potencia consumida por la totalidad de equipos (kW)	Energía total consumida (kW-h/día)
3	Banda transportadora para la etapa de clasificación manual	1.49	4.48	107.46
7	Bandas para transporte durante otras etapas del proceso	1.49	10.45	250.74
1	Separador ferromagnético	4.00	4.00	96.00
1	Separador Eddy Current	7.09	7.09	170.14
1	Separador de rayos-X (VynylCicle)	3.60	3.60	86.40
1	Embaladora	7.46	7.46	179.10
2	Debaladora	30.00	60.00	1440.00
1	Molino de cuchillas	264.00	264.00	6336.00
1	Air classifier	45.00	45.00	1080.00
1	Agitador en tanque separación de corriente principal de plásticos	30.00	30.00	720.00
1	Agitador en tanque separación de no poliolefinas con solución salina	15.00	15.00	360.00
1	Agitador en tanque separación de poliolefinas con solución Et-OH	15.00	15.00	360.00
1	Agitador en tanque de lavado en caliente PET y trazas de PVC	5.00	5.00	120.00

Continuación tabla 34.

<b>Cantidad</b>	<b>Equipo</b>	<b>Potencia unitaria (kW)</b>	<b>Potencia consumida por la totalidad de equipos (kW)</b>	<b>Energía total consumida (kW-h/día)</b>
1	Agitador en tanque de lavado en caliente poliolefinas	7.50	7.50	180.00
1	Agitador en tanque de lavado con detergente PET y trazas de PVC	5.00	5.00	120.00
1	Agitador en tanque de lavado con detergente poliolefinas	7.50	7.50	180.00
1	Agitador en tanque de enjuague PET y trazas de PVC	5.00	5.00	120.00
1	Agitador en tanque de enjuague poliolefinas	7.50	7.50	180.00
1	Secador centrífugo línea de PET	55.00	55.00	1320.00
2	Secador centrífugo líneas de poliolefinas	30.00	60.00	1440.00
1	Secador térmico línea de PET	520.00	520.00	12480.00
2	Secador térmico líneas de poliolefinas	337.31	674.62	16190.98
1	Separador electrostático de PVC	30.00	30.00	720.00
1	Extrusor y peletizado línea de PET	820.00	820.00	19680.00
2	Extrusor y peletizado líneas de poliolefinas	493.00	986.00	23664.00
2	Mezcladores para líneas de poliolefinas	1.49	2.98	71.64
1	Transportador de tornillo para tanque de separación con agua	1.87	1.87	44.77
1	Transportador de tornillo para tanque de separación con solución salina	1.87	1.87	44.77
1	Transportador de tornillo para tanque de separación con solución de etanol	1.87	1.87	44.77
3	Transportador de tornillo para tanques de lavado de PET	1.87	5.60	134.32
1	Transportador de tornillo a la salida de secado térmico de PET	1.87	1.87	44.77
1	Transportador de tornillo a la salida de separación electrostática de PVC	1.87	1.87	44.77
1	Transportador de tornillo a la salida molino hacia air classifier	1.87	1.87	44.77
2	Transportador de tornillo a la salida de secado térmico hacia mezcladores de poliolefinas	1.87	3.73	89.55
2	Transportador de tornillo a la salida de secado mecánico hacia secado térmico de poliolefinas	1.87	3.73	89.55
1	Transportador de tornillo a la salida de secado mecánico hacia secado térmico de PET	1.87	1.87	44.77
1	Calentador eléctrico para tanque de lavado de PET	150.00	150.00	3600.00

Continuación tabla 34.

Cantidad	Equipo	Potencia unitaria (kW)	Potencia consumida por la totalidad de equipos (kW)	Energía total consumida (kW-h/día)
1	Calentador eléctrico para tanque de lavado de poliolefinas	100.00	100.00	2400.00
1	Compresor	35.00	35.00	840.00

Teniendo en cuenta los datos mostrados en la tabla anterior se calculó la requisición energética del proceso completo, con lo cual se determinó el consumo de energía por masa unitaria de producto, tal como se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35. Consumo energético global.

Consumo energético diario	Producción total diaria	Consumo energético por unidad de masa de producto
95119.29 kW-h	77805.83 kg	1.22 kW-h/kg pellets

## F. Consumo de agua durante el proceso

Tabla 36. Manejo de las soluciones durante el proceso.

Etapas	Alimentación de solución al día
Separación con agua	2 veces
Separación con solución de NaCl	1 vez
Separación con solución de CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	1 vez
Lavado con solución de NaOH	1 veces
Lavado con detergente	6 veces
Lavado de enjuague	6 veces

Tabla 37. Requerimiento de agua en el proceso de reciclaje.

Etapa	Flujo másico (kg/día)	Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /día)
Separación con agua	24532.68	24.53
Separación con solución de NaCl	5618.98	5.62
Separación con solución de CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	3165.63	3.17
Lavado con solución de NaOH	3273.80	3.27
Lavado con detergente	19642.77	19.64
Lavado de enjuague	19761.36	19.76
Consumo de agua total	75995.22	76.00

## G. Estimación de la inversión inicial

La inversión inicial comprende el costo del equipo, gastos de importación (flete, seguro, arancel, IVA, aduana) e instalación del mismo. El costo del equipo se estimó mediante dos métodos: de acuerdo a la tabla 9.50 (Perry, 2001), y tabla 16.32 (Seider, 2004), las cuales se basan en los índices de costo de M&S (Marshall & Swift Equipment Cost Index) y CE (Chemical Engineering Plant Cost Index), respectivamente. A continuación se muestra un ejemplo de cálculo para estos dos métodos.

Para ambos métodos se utiliza la ecuación 13, obteniendo así el costo actual del equipo a partir de un costo base correspondiente a una fecha anterior.

$$\text{Costo actual} = \text{Costo base} \left( \frac{I_{\text{actual}}}{I_{\text{base}}} \right)$$

(Ec. 13) (Seide, 2004)

Donde:

$I_{\text{actual}}$  = índice de costo actual

$I_{\text{base}}$  = índice de costo correspondiente a la fecha en que se determinó el costo base

### 1. Índice M&S

$$C_2 = C_1 \left( \frac{q_2}{q_1} \right)^n$$

(Ec. 14) (Perry, 2001)

Donde:

$C_2$  = costo FOB del equipo de capacidad  $q_2$  a un  $I_{base}$  de 1000

$C_1$  = costo FOB del equipo de capacidad  $q_1$  un  $I_{base}$  de 1000

$q_2$  = capacidad 2 del equipo

$q_1$  = capacidad 1 del equipo

$n$  = constante

El costo FOB del tanque de separación de la corriente principal de plásticos se determina mediante las ecuaciones 13 y 14. Según la tabla 9.50 (Perry, 2001), para un cilindro vertical de acero al carbón:

$$- C_1 = \$3,300.00$$

$$- q_1 = 3.8 \text{ m}^3$$

$$- n = 0.30$$

De acuerdo al dimensionamiento de equipo, la capacidad requerida para el tanque es de  $16.87 \text{ m}^3$ . Por lo tanto:

$$C_2 = \$3300.00 * \left( \frac{16.87 \text{ m}^3}{3.8 \text{ m}^3} \right)^{0.30} = \$5160.41$$

Ya que se usarán tanques de acero inoxidable, se hace la corrección respectiva por material, de acuerdo a la tabla 9.58 (Perry, 2001).

$$C_2 = \$5160.41 * 2.8 = \$14449.15$$

El índice de M&S para el costo base de la tabla 9.50 (Perry, 2001) es de 1000. Mientras que el índice de M&S para el primero trimestre del año 2011 es de 1490.2, valor que se utiliza para realizar la corrección respectiva.

$$\text{Costo actual FOB} = \$14449.15 \left( \frac{1490.2}{1000} \right) = \$21532.12$$

Se siguió un procedimiento similar para estimar el costo de todos los tanques necesarios en el proceso. El costo de la mayor parte del equipo restante se calculó mediante la tabla 16.32 (Seider, 2004) en base al índice de costo CE. Para una mínima cantidad de equipos no se realizó un cálculo para estimar el costo, sino que éste fue obtenido directamente de fuentes de internet.

**2. Índice CE.** En la tabla 16.32 (Seider, 2004), no se especifica una ecuación general para la estimación del costo, sino que cada equipo posee una ecuación específica. Para los transportadores de tornillo se utiliza la ecuación:

$$C_p = 55.6 DL^{0.59}$$

(Ec. 15) (Seider, 2004)

Donde:

$C_p$  = costo FOB del transportador de tornillo a un  $I_{base}$  de 394 (sin incluir motor)

D = diámetro del tornillo en pulgadas

L = longitud del tornillo en pies

Para el transportador de tornillo necesario en el tanque de separación de la corriente principal de plásticos:

- Diámetro = 6"
- Longitud = 25 pies

$$C_p = 55.6 * (6) * (25)^{0.59} = \$2228.49$$

El índice CE para el costo base de la tabla 16.32 (Seider, 2004) es de 394. Mientras que el índice CE para abril del año 2011 es de 582.4, valor que se utiliza para realizar la corrección respectiva.

$$\text{Costo actual FOB} = \$2228.49 \left( \frac{582.4}{394} \right) = \$3294.09$$

Se siguió un procedimiento similar para estimar el costo la mayor parte del equipo, tomando en cuenta las diferentes ecuaciones mostradas en la tabla 16.32 (Seider, 2004).

**3. Costos de importación e instalación de equipo.** Los costos por importación de equipo se estimaron tomando en cuenta los siguientes porcentajes aplicados al costo FOB del equipo:

*Tabla 38. Porcentajes utilizados para la estimación de los costos involucrados por importación de equipo.*

<b>Rubro</b>	<b>Porcentaje aplicado</b>
Flete	10%
Seguro	1%
Arancel	10%
Gastos internos	1%
IVA*	12 %

\*Nota: el porcentaje del IVA se aplicó sobre el flete, seguro y arancel.

Respecto a los costos de instalación, de acuerdo a la tabla 9.51 (Perry, 2001), se utilizaron los porcentajes de la Tabla 39 sobre el costo total del equipo (costo FOB más costos de importación). Dichos porcentajes constituyen una estimación para el montaje de una planta de procesamiento de sólidos.

*Tabla 39. Porcentajes utilizados para la estimación de los costos de instalación del equipo en una planta de procesamiento de sólidos.*

<b>Rubro</b>	<b>Porcentaje aplicado</b>
Instalación de equipo	23%
Instalación eléctrica	25%
Instrumentación	10%
Imprevistos	26%

**4. Datos calculados e inversión inicial total.** Los datos calculados para la obtención de los costos del equipo se muestran en la Tabla 41, donde se observa que el costo por la totalidad de equipos es de \$6,214,795.02. Sin embargo, este último dato no incluye los costos de instalación. La inversión inicial total que comprende los costos de instalación se muestran en la Tabla 40 a continuación.

*Tabla 40. Inversión inicial total del proyecto.*

Costo total en equipo	\$ 6,214,795.02
Instalación de equipo	\$ 1,429,402.85
Instalación eléctrica	\$ 1,553,698.75
Instrumentación	\$ 621,479.50
Imprevistos	\$ 1,615,846.70
INVERSIÓN INICIAL TOTAL EN	\$ 11,435,222.84
EQUIPO	Q 89,652,147.03*

\*Correspondiente a un tipo de cambio de Q7.84 (Banco de Guatemala, 05/01/12)

Tabla 41. Costos de inversión en equipo.

No. equipos	Equipo	Costo FOB unitario (\$)	Costo FOB total (\$)	Flete (\$)	Seguro (\$)	Arancel (\$)	IVA (\$)	Gastos internos (\$)	Costo total sin instalación (\$)
3	Banda transportadora para la etapa de clasificación manual	14832.54	44497.61	4449.76	444.98	4449.76	6461.05	444.98	60748.14
7	Bandas para transporte durante otras etapas del proceso	9888.36	69218.51	6921.85	692.19	6921.85	10050.53	692.19	94497.11
10	Motor para las bandas transportadoras	566.38	5663.80	566.38	56.64	566.38	822.38	56.64	7732.22
1	Separador ferromagnético	1295778.99	1295778.99	129577.90	12957.79	129577.90	188147.11	12957.79	1768997.47
1	Separador Eddy Current	194366.72	194366.72	19436.67	1943.67	19436.67	28222.05	1943.67	265349.44
1	Separador de rayos-X (VynylCicle)	200000.00	200000.00	20000.00	2000.00	20000.00	29040.00	2000.00	273040.00
1	Embaladora	144342.64	144342.64	14434.26	1443.43	14434.26	20958.55	1443.43	197056.58
2	Debaladora	106435.80	212871.61	21287.16	2128.72	21287.16	30908.96	2128.72	290612.32
1	Molino de cuchillas	14527.615	14527.62	1452.76	145.28	1452.76	2109.41	145.28	19833.10
1	Air classifier	88857.38	88857.38	8885.74	888.57	8885.74	12902.09	888.57	121308.09
1	Tanque de separación de corriente principal de plásticos	21532.12	21532.12	2153.21	215.32	2153.21	3126.46	215.32	29395.65
1	Tanque separación de no poliolefinas con solución salina	17649.30	17649.30	1764.93	176.49	1764.93	2562.68	176.49	24094.83
1	Tanque separación de poliolefinas con solución Et-OH	17732.89	17732.89	1773.29	177.33	1773.29	2574.82	177.33	24208.94
1	Tanque de lavado en caliente PET y trazas de PVC	51024.96	51024.96	5102.50	510.25	5102.50	7408.82	510.25	69659.28
1	Tanque de lavado en caliente poliolefinas	58958.74	58958.74	5895.87	589.59	5895.87	8560.81	589.59	80490.47
1	Tanque de lavado con detergente PET y trazas de PVC	12365.92	12365.92	1236.59	123.66	1236.59	1795.53	123.66	16881.95
1	Tanque de lavado con detergente poliolefinas	13343.23	13343.23	1334.32	133.43	1334.32	1937.44	133.43	18216.18
1	Tanque de enjuague PET y trazas de PVC	12365.92	12365.92	1236.59	123.66	1236.59	1795.53	123.66	16881.95
1	Tanque de enjuague poliolefinas	13343.23	13343.23	1334.32	133.43	1334.32	1937.44	133.43	18216.18
1	Secador centrífugo línea de PET	230695.98	230695.98	23069.60	2306.96	23069.60	33497.06	2306.96	314946.15
2	Secador centrífugo líneas de poliolefinas	202192.72	404385.44	40438.54	4043.85	40438.54	58716.77	4043.85	552067.00
1	Secador térmico línea de PET	64948.96	64948.96	6494.90	649.49	6494.90	9430.59	649.49	88668.32
2	Secador térmico líneas de poliolefinas	64948.96	129897.92	12989.79	1298.98	12989.79	18861.18	1298.98	177336.64
1	Separador electrostático de PVC	200000.00	200000.00	20000.00	2000.00	20000.00	29040.00	2000.00	273040.00
1	Extrusor y peletizado línea de PET	233407.89	233407.89	23340.79	2334.08	23340.79	33890.83	2334.08	318648.45
2	Extrusor y peletizado líneas de poliolefinas	208268.04	416536.09	41653.61	4165.36	41653.61	60481.04	4165.36	568655.07

Continuación tabla 41.

No. equipos	Equipo	Costo FOB unitario (\$)	Costo FOB total (\$)	Flete (\$)	Seguro (\$)	Arancel (\$)	IVA (\$)	Gastos internos (\$)	Costo total sin instalación (\$)
2	Mezcladores para líneas de poliolefinas	19345.70	38691.40	3869.14	386.91	3869.14	5617.99	386.91	52821.50
1	Transportador de tornillo para tanque de separación con agua	3294.09	3294.09	329.41	32.94	329.41	478.30	32.94	4497.10
1	Transportador de tornillo para tanque de separación con solución salina	3294.09	3294.09	329.41	32.94	329.41	478.30	32.94	4497.10
1	Transportador de tornillo para tanque de separación con solución de etanol	3294.09	3294.09	329.41	32.94	329.41	478.30	32.94	4497.10
3	Transportador de tornillo para tanques de lavado de PET	3294.09	9882.28	988.23	98.82	988.23	1434.91	98.82	13491.29
1	Transportador de tornillo a la salida de secado térmico de PET	3294.09	3294.09	329.41	32.94	329.41	478.30	32.94	4497.10
1	Transportador de tornillo a la salida de separación electrostática de PVC	3294.09	3294.09	329.41	32.94	329.41	478.30	32.94	4497.10
1	Transportador de tornillo a la salida molino hacia air classifier	3294.09	3294.09	329.41	32.94	329.41	478.30	32.94	4497.10
2	Transportador de tornillo a la salida de secado térmico hacia mezcladores de poliolefinas	3294.09	6588.19	658.82	65.88	658.82	956.60	65.88	8994.19
2	Transportador de tornillo a la salida de secado mecánico hacia secado térmico de poliolefinas	3294.09	6588.19	658.82	65.88	658.82	956.60	65.88	8994.19
1	Transportador de tornillo a la salida de secado mecánico hacia secado térmico de PET	3294.09	3294.09	329.41	32.94	329.41	478.30	32.94	4497.10
1	Agitador tanque separación de corriente principal de plásticos	28139.47	28139.47	2813.95	281.39	2813.95	4085.85	281.39	38416.01
2	Agitadores tanques separación de poliolefinas y no poliolefinas	19353.51	38707.02	3870.70	387.07	3870.70	5620.26	387.07	52842.83
2	Agitadores tanques de lavado de PET	10693.36	21386.73	2138.67	213.87	2138.67	3105.35	213.87	29197.16
1	Agitador tanque de lavado en caliente de PET	12457.82	12457.82	1245.78	124.58	1245.78	1808.88	124.58	17007.42
2	Agitadores tanques de lavado de poliolefinas	13310.78	26621.57	2662.16	266.22	2662.16	3865.45	266.22	36343.76
1	Agitador tanque de lavado en caliente de poliolefinas	15696.91	15696.91	1569.69	156.97	1569.69	2279.19	156.97	21429.42
14	Motores para los tornillos	600.95	8413.36	841.34	84.13	841.34	1221.62	84.13	11485.92
1	Calentador eléctrico lavado de PET	53052.45	53052.45	5305.25	530.52	5305.25	7703.22	530.52	72427.21
1	Calentador eléctrico lavado de poliolefinas	36949.76	36949.76	3694.98	369.50	3694.98	5365.11	369.50	50443.82
1	Compresor	56616.38	56616.38	5661.64	566.16	5661.64	8220.70	566.16	77292.68
2	Motores de los mezcladores	566.38	1132.76	113.28	11.33	113.28	164.48	11.33	1546.44
<b>TOTAL</b>									<b>6214795.02</b>

## H. Estimación del período de recuperación de la inversión (PRI)

Para tener una idea de la factibilidad del proyecto de reciclaje propuesto, se estimó de manera muy general el período de recuperación de la inversión en equipo. Se procedió a realizar un flujo de caja diferencial, comparando los ingresos y egresos del presente proyecto con la producción de resina virgen. No fue posible realizar un flujo de caja más exacto debido a la falta de información respecto a los costos totales de producción e inversión total (terreno, construcción, mobiliario y equipo de oficina, entre otros).

**1. Ingresos diferenciales.** El ahorro de energía respecto a la producción de resina virgen constituye un ingreso que se calcula de la siguiente manera:

- Consumo energético por unidad de masa de producto: 1.22 kW-h/kg (4.40 MJ/kg  $\cong$  5 MJ/kg)

- Energía utilizada para producir resina virgen (PET): 70-83 MJ/kg

$$\text{Ahorro energético} = 70 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} - 5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 65 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 18.05 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}}$$

- Costo energía de acuerdo a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) de Guatemala:  $\cong$  Q1.60/kW-h

- Producción anual total: 25,675,925 kg

$$\text{Ingreso diferencial} = \frac{25,675,925 \text{ kg}}{\text{año}} * \frac{18.05 \text{ kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}} * \frac{\text{Q}1.60}{\text{kW} \cdot \text{h}} = \frac{\text{Q}741,748,933.96}{\text{año}}$$

**2. Egresos diferenciales.** Debido a que el material reciclado se vende a un precio menor respecto a la resina virgen, existe un egreso en ventas en el proyecto de reciclaje respecto a la producción de resina virgen, cuyo valor se calcula a continuación.

- Precio de venta de resina virgen (termoplásticos):  $\cong$  US \$2200/TM = Q17.25/kg
- Precio de venta de resina reciclada: Q8.00/kg

$$\text{Diferencia en precio de venta} = \frac{\text{Q}17.25}{\text{kg}} - \frac{\text{Q}8.00}{\text{kg}} = \frac{\text{Q}9.25}{\text{kg}}$$

$$\text{Egreso diferencial} = \frac{25,675,925 \text{ kg}}{\text{año}} * \frac{\text{Q}9.25}{\text{kg}} = \frac{\text{Q}237,450,951.04}{\text{año}}$$

A partir de los ingresos y egresos anuales calculados, se obtiene el flujo de caja mostrado en la Tabla 42 (página 99).

**3. Cálculo del período de recuperación de la inversión en equipo.** Para calcular el período en que se recupera la inversión en equipo (mostrada en la sección G), se procede a utilizar la siguiente fórmula.

$$PRI = \frac{\text{Inversión}}{\text{Utilidades netas}}$$

(Ec. 16) (Casia, 2011)

- Inversión en equipo: Q89,652,147.03
- Utilidades netas al año: Q504,297,982.91

$$PRI = \frac{Q89,652,147.03}{Q504,297,982.91} = 0.18 \cong 0.20 \text{ año}$$

Tabla 42. Estimación del flujo de caja.

Período (año)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>(-) Inversión inicial</b>											
Equipo	-Q89,652,147										
<b>(+) Ingresos diferenciales</b>											
Ahorro en costos de operación por consumo de energía		Q741,748,934	Q741,748,934	Q741,748,934	Q741,748,934	Q741,748,934	Q741,748,934	Q741,748,934	Q741,748,934	Q741,748,934	Q741,748,934
<b>(-) Egresos diferenciales</b>											
Costo de venta menor al de la resina virgen		-Q237,450,951	-Q237,450,951	-Q237,450,951	-Q237,450,951	-Q237,450,951	-Q237,450,951	-Q237,450,951	-Q237,450,951	-Q237,450,951	-Q237,450,951
<b>Flujo de caja</b>	-Q89,652,147	Q504,297,983	Q504,297,983	Q504,297,983	Q504,297,983	Q504,297,983	Q504,297,983	Q504,297,983	Q504,297,983	Q504,297,983	Q504,297,983



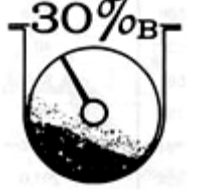

## I. Clasificación de materiales sólidos a granel según sus características

Tabla 43. Clasificación del material.

Características del Material		Designación de clase
Tamaño	Muy fino Tamiz No. 200 (0.0029") y debajo de éste	A <sub>200</sub>
	Tamiz No. 100 (0.0059") y debajo de éste	A <sub>100</sub>
	Tamiz No. 40 (0.016") y debajo de éste	A <sub>40</sub>
	Fino Tamiz No. 6 (0.132") y debajo de éste	B <sub>6</sub>
	1/2" y por encima	C <sub>1/2</sub>
	Granular 3" y por encima	D <sub>3</sub>
	7" y por encima	D <sub>7</sub>
Grumoso	16"	D <sub>16</sub>
	Por encima de 16" para ser específico	D <sub>x</sub>
	X - tamaño máximo real	
Irregular	Fibroso, cilíndrico, etc.	E
Fluidez	Fluye muy libremente	1
	Fluye libremente	2
	Fluidez promedio	3
	Flujo lento	4
Abrasividad	Medianamente abrasivo	5
	Moderadamente abrasivo	6
	Extremadamente abrasivo	7
Propiedades misceláneas o peligros	Se acumula y endurece	F
	Genera electricidad estática	G
	Se descompone o deteriora en almacenamiento	H
	Flamable	J
	Se convierte en plástico o tiende a suavizar	K
	Muy polvoriento	L
	Se airea y convierte en fluido	M
	Explosivo	N
	Adherencia	O
	Capaz de ser contaminado	P
	Capacidad de degradarse	Q
	Emite gases dañinos o tóxicos	R
	Altamente corrosivo	S
	Medianamente corrosivo	T
	Higroscópico	U
	Se aglomera	V
	Con presencia de grasas y/o aceites	W
Se comprime bajo presión	X	
Muy ligero - puede ser llevado por el viento	Y	
Elevada temperatura	Z	

## J. Cuadro de capacidad de transportadores de tornillo

Tabla 44. Capacidades de transportadores de tornillo horizontales.

Código de la clase de material	Nivel de carga	Diámetro del tornillo (pulgadas)	RPM (valor máximo recomendado)	Capacidad (pie <sup>2</sup> /h)	
				RPM máx	1 RPM
A-15 A-25 B-15 B-25 C-15 C-25		6	165	368	2.23
		9	155	1270	8.20
		12	145	2820	19.40
		14	140	4370	31.20
		16	130	6060	46.70
		18	120	8120	67.60
		20	110	10300	93.70
	24	100	16400	164.00	
A-35 D-35 A-45 D-45 B-35 E-15 B-45 E-25 C-35 E-35 C-45 E-45 D-15 D-25	<p>Materiales no abrasivos</p> 	6	120	180	1.49
		9	100	545	5.45
		12	90	1160	12.90
		14	85	1770	20.80
		16	80	2500	31.20
		18	75	3380	45.00
		20	70	4370	62.50
		24	65	7100	109.00
A-16 C-16 A-26 C-26 A-36 C-36 A-46 C-46 B-16 D-16 B-26 D-26 B-36 D-36 B-46 D-46	<p>Materiales abrasivos</p> 	6	60	90	1.49
		9	55	300	5.45
		12	50	645	12.90
		14	50	1040	20.80
		16	45	1400	31.20
		18	45	2025	45.00
		20	40	2500	62.50
		24	40	4360	109.00
A-17 C-17 A-27 C-27 A-37 C-37 A-47 C-47 B-17 D-17 B-27 D-27 B-37 D-37 B-47 D-47		6	60	45	0.75
		9	55	150	2.72
		12	50	325	6.46
		14	50	520	10.40
		16	45	700	15.60
		18	45	1010	22.50
		20	40	1250	31.20
		24	40	2180	54.60

### K. Información necesaria para calcular potencia en transportadores de tornillo

Tabla 45. Factores “D”.

Tamaño del transportador (pulgadas)	Tipo de rodamientos en suspensión			
	Bola o rodillos	Madera, revestidos de metal, Nylon o moldeado	Bronce autolubricante	Hierro blanco o acero manganesico
3	10	15	24	35
4	12	21	33	50
6	18	33	54	80
9	32	54	96	130
10	38	66	114	160
12	55	98	171	250
14	78	135	255	350
16	106	186	336	480
18	140	240	414	600
20	165	285	510	700
24	230	390	690	950

Tabla 46. Tabla de materiales sólidos.

Material	Libras fuerza por pie cúbico	Clase de material	Grupo componente	Factor de material F
Maní limpio con cáscara	15-20	18D335Q	2A-2B	0.6
Maní sin limpiar con cáscara	15-20	18D336Q	3D	0.7
Maní sin cáscara	35-45	40C1/235Q	1B	0.4
Guisantes secos	45-50	48C1/215NQ	1A-1B-1C	0.5
Perlita expandida	8-12	10C1/236	2D	0.6
Fertilizante fosfato ácido	60	60B625T	2A-2B	1.4
Roca quebrada de fosfato	75-85	80Dx36	2D	2.1
Roca pulverizada de fosfato	60	60B636	2D	1.7
Arena de fosfato	90-100	95B637	3D	2
Perlas de poliestireno	40	40B635PQ	1B	0.4
Polvo de PVC	20-30	25A10045KT	2B	1
Pellets de PVC	20-30	25E45KPQT	1B	0.6
Pellets de polietileno	30-35	33C1/245Q	1A-1B	0.4

Tabla 47. Capacidad de torque en transportadores de tornillo.

Tamaño del transportador (pulg)	Tamaño de la tubería	Diámetro de acoplamiento (pulg)	HP máx a 125 RPM	HP máx a 100 RPM	HP máx a 75 RPM	HP máx a 50 RPM
6 y 9	2.0	1 1/2	6.25	5.0	3.75	2.5
9 y 10	2.5	2.0	15.00	12.0	9.00	6.0
12 y 14	3.0	2 7/16	18.75	15.0	11.25	7.5
12, 14, 16, 18 y 20	3.5	3.0	30.75	24.6	18.50	12.3
20 y 24	4.0	3 7/16	43.75	35.0	26.25	17.5

# L. Diagrama de bloques del proceso

Figura 26. Diagrama de bloques del proceso.

