



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE QUÍMICA

“DESARROLLO DE UN PROCESO DE  
SEPARACIÓN ALUMINIO-POLÍMERO A  
PARTIR DE TETRAPACK”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:  
JUAN EDUARDO RODRÍGUEZ GÓMEZ

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. VICTOR VARELA GUERRERO

TOLUCA DE LERDO, MÉXICO

JUNIO 2013



Toluca, México, 17 de mayo de 2013

**P. I.Q. JUAN EDUARDO RODRÍGUEZ GÓMEZ**

FACULTAD DE QUÍMICA, UAEM.

PRESENTE

La Dirección de la Facultad de Química de la UAEM, comunica a Usted que el Jurado de su Evaluación Profesional, en la modalidad **TESIS**, estará formado por:

M. en C. JOSÉ FRANCISCO BARRERA PICHARDO  
**PRESIDENTE**

Dr. VÍCTOR VARELA GUERRERO  
**VOCAL**

Dra. SUSANA HERNÁNDEZ LÓPEZ  
**SECRETARIO**

Dra. DORA ALICIA SOLÍS CASADOS  
**SUPLENTE**

Sin más por el momento le envío un respetuoso saludo.

ATENTAMENTE  
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO  
"2013, 50 Aniversario Luctuoso del Poeta Heriberto Enríquez"

M. en A. P. GUADALUPE OFELIA SANTAMARÍA GONZÁLEZ  
**DIRECTORA**



c.c.p. Expediente  
c.c.p. Archivo.



Éste no es el fin.  
Ni siquiera es el principio del fin.

Tan solo es el fin del principio.

Winston Churchill

## **Dedicatorias**

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis Padres, Esperanza y Eduardo, gracias por la vida que me dieron, ahora estoy culminado una etapa más en mi vida, por el apoyo incondicional, así como los consejos y valores que me dieron para ser la persona que ahora soy, pero principalmente les agradezco por la herencia que me dieron, el ser Ingeniero Químico.

A mis hermanos, Toño, Roció y Mónica, por el tiempo que me han brindado para mi formación, gracias por su paciencia, por preocuparse por su hermano menor y por compartir sus vidas, pero sobre todo por estar en otro momento tan importante de mi vida.

A Yosirine Quetzalli por que en cada uno de los momentos más complicados a lo largo de estos casi 4 años, me ha dado su compañía, comprensión, tolerancia y amor para salir adelante.

A mi abuela Nieves, por preocuparse y cuidarme cada día de mi vida.

Al Dr Victor Varela por su infinito apoyo en este proyecto, gracias por sus lecciones de vida que me han ayudado a formarme como persona y profesionista.

A mis sinodales, gracias por la contribución en la realización de este trabajo y por su tiempo.

## Contenido

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Justificación</b> .....	3
<b>Capítulo I. Antecedentes</b> .....	13
1.1 Composición del Empaque Flexible tipo Tetra Pak® (EFT) .....	13
1.1.1 Papel .....	13
1.1.2 Plástico (Polietileno) .....	14
1.1.2.1 Proceso de producción industrial del polietileno .....	18
1.1.2.2 Producción de Polietileno de Baja Densidad (PEBD) <sup>13</sup> .....	19
1.1.2.2.1 Proceso industrial de alta presión de PEBD <sup>17</sup> .....	20
1.1.2.3 Producción del polietileno de alta densidad (PEAD) .....	20
1.1.2.3.1 Proceso industrial de baja presión del PEAD <sup>18</sup> .....	21
1.1.2.4 Propiedades del Polietileno .....	22
1.1.2.5 Producción en el mercado de polietileno en México <sup>20</sup> .....	25
1.1.3 Aluminio .....	31
1.1.3.1 Proceso de producción del aluminio .....	31
1.1.3.1.1 Obtención del óxido de aluminio (Proceso Bayer) .....	34
1.1.3.1.2 Obtención del aluminio: el proceso Hall-Hérault <sup>24</sup> .....	38
1.1.3.2 Propiedades del aluminio .....	40
1.1.3.3 Mercado del aluminio en México .....	42
1.1.3.4 Reciclaje del aluminio .....	45
1.2. Capas del EFT <sup>37</sup> .....	46
1.2.1 Manufactura del EFT .....	47
1.2.1.1 Impresión .....	47
1.2.1.2. Laminación .....	48
1.2.1.3 Corte .....	49
1.2.2. Producción de envases EFT. ....	49
1.2.3 Reciclaje de EFT .....	50
1.3 Aceite vegetal re-usado .....	51
1.3.1 Características de aceites vegetales <sup>47</sup> .....	54
1.3.1.1 Ventajas de utilizar aceite vegetal en comparación con el aceite sintético o derivado del petróleo .....	56

1.3.1.2 Desventajas de utilizar aceite vegetal en comparación con un aceite sintético o derivado del petróleo .....	56
1.3.2 Variación de las propiedades del aceite con base en el reusó y a la temperatura .....	57
1.3.3 Estadísticas del consumo de aceite en México <sup>51</sup> .....	58
<b>Capítulo II. Metodología</b> .....	61
2.1 Materiales .....	63
2.2 Equipo empleado .....	63
2.3 Muestra de EFT. ....	64
2.4 Porcentaje de Aluminio en la muestra.....	64
2.5 Lavado y secado de la muestra de EFT.....	65
2.6 Molienda de la muestra de EFT. ....	65
2.7 1er calentamiento de la muestra de EFT .....	66
2.8 2do calentamiento de la muestra de EFT.....	68
2.9 3er calentamiento de la muestra de EFT. ....	68
2.10 Filtración del aceite con el polímero.....	69
2.11 Lavado del polímero.....	70
2.12 Lavado del aluminio. ....	70
<b>Capítulo III. Resultados y discusión</b> .....	71
3.1 Porcentaje de aluminio en la muestra. ....	71
3.2 Porcentaje de papel contenido en la muestra de EFT.....	72
3.3 Porcentaje de aluminio en la muestra final.....	73
3.4 Porcentaje de separación de aluminio en la muestra de EFT.....	74
3.5 Porcentaje de polietileno en la muestra final.....	74
3.6 Porcentaje de separación de polietileno en la muestra de EFT.....	74
3.7 Balance de masa del proceso de separación del aluminio y polímero a partir de EFT. ....	75
3.8 Porcentaje de recuperación y composición de los productos de salida pertenecientes al polímero en cada una de las etapas del proceso. ....	77
3.9 Porcentaje de recuperación y composición de los productos de salida pertenecientes al aluminio en cada una de las etapas del proceso.....	80
<b>Capítulo IV Conclusiones</b> .....	84
Recomendaciones .....	85
Bibliografía.....	86

## Introducción

Este trabajo fue pensado para fomentar y fortalecer la cultura del reciclaje principalmente en nuestro país, el reto al que se enfrenta la sociedad del siglo XXI ante los problemas actuales de tratamiento y eliminación de los residuos generados en nuestras actividades diarias y que generalmente no ponemos atención. El término "cultura", según la Real Academia Española, la define como "Conjunto de modos de vida y costumbres, conocimientos y grado de desarrollo artístico, científico, industrial, en una época, grupo social, etc." De otra manera, "reciclaje" define el proceso industrial por el que los residuos continúan su ciclo de vida, convirtiéndose en materias primas para la obtención de nuevos productos o bien en energía.

Este trabajo se concreta a la utilización del Empaque Flexible tipo Tetra Pak® (EFT) para la recuperación del aluminio y polímero mediante un proceso novedoso de separación, que también puede considerarse sustentable con un bajo costo de operación, es decir utilizando la menor cantidad de materia prima y de energía posible<sup>1</sup>.

En 2010 se produjeron en México 6,000 millones de envases Tetra Pak, de los cuales sólo se recicló 15%<sup>2</sup>. El Gran reto para aumentar este porcentaje en la actualidad, es desarrollar nuevas tecnologías que permitan una separación óptima del aluminio y del polímero sin dañar sus propiedades, esto sólo puede realizarse mediante la investigación y desarrollo. Por lo cual, la presente investigación se centró en la separación del aluminio y del polímero de estos envases, utilizando una técnica novedosa y sustentable que permitiera remover el polímero de las películas de aluminio que se encuentra presente en el material que resulta del proceso de separación de la celulosa de estos empaques en un proceso anterior. Hoy en día el proceso de separación sólo contempla al aluminio para poder reutilizarlo como materia prima para diversos artículos, y al polímero como una fuente de energía, por lo tanto en la actualidad no existe en México un proceso que permita la separación del aluminio y el polímero.

Esta investigación inició sin ningún antecedente de investigación en que se pudiera tener una referencia; es decir, se investigaron los posibles compuestos que ayudarían a la separación del polímero sin llegar a degradarlo y además que el aluminio se pudiera recuperar con una mayor facilidad, el reto era complicado porque hasta ahora no hay información relacionada a este trabajo.

Este trabajo buscaba algún compuesto o material que permitiera solubilizar al polímero mediante calentamiento, se consideró la posibilidad de utilizar aceite vegetal, ya que este compuesto puede hasta una temperatura de 250°C sin que se degrade y además por su solubilidad en caliente permite tener una mejor afinidad, pero para poder realizar este proceso sustentable se decidió reutilizar aceite vegetal empleado en establecimientos de productos alimenticios fritos como son las papa fritas y papas a la francesa.

Los resultados fueron satisfactorios, puesto que se observó la separación del polímero respecto del aluminio utilizando el aceite antes mencionando, por medio de calentamiento hasta una temperatura de 140°C, después fue necesario un proceso de lavado tanto del aluminio como del polímero con alcohol etílico para eliminar el exceso de aceite y tratar el aluminio con alcohol en ebullición. Esto permitió que el proceso fuera sustentable con el medio ambiente, puesto que se reutilizaron dos desechos como materia prima que se generan a diario en nuestro país, el aceite y los envases EFT, además de utilizar etanol que posteriormente se reutiliza en el proceso.

En este trabajo se explicará detalladamente como se llegaron a los resultados finales, enfatizando cuales fueron los factores a considerar así como también de las variables y parámetros que se analizaron, para poder desarrollar el proceso de separación del aluminio-polímero.

## Justificación

La producción, la comercialización y los residuos de envases de diferentes materiales inciden en el medio ambiente. En primer lugar, hay una disminución de los recursos naturales no renovables. En segundo lugar, generan contaminación de agua, de aire y de suelo. Por último, ejercen presión sobre los sistemas de gestión de los residuos sólidos. Los métodos para la disposición de los residuos de envases son limitados<sup>3</sup>.

Tradicionalmente la gran mayoría de los envases se depositan en tiraderos. Otra porción muy limitada se recicla o se incinera y otra porción permanece en calles, caminos, campos y áreas naturales de nuestro país<sup>3</sup>.

En la práctica, la mayor proporción de los envases terminan en los tiraderos, lo cual representa al menos dos problemas a la sociedad. El primero, un aumento en la demanda de insumos vírgenes para la producción de envases con sus consecuentes impactos ambientales. El segundo, el incremento en la demanda de infraestructura y servicios para la disposición final de residuos como son rellenos sanitarios, recolección y transporte, los cuales a su vez tienen efectos negativos al medio ambiente. Los costos sociales de ambos problemas, si bien no han sido estimados, podrían resultar importantes<sup>3</sup>.

La continua degradación del medio ambiente ha forzado a especialistas de diversas disciplinas a analizar sus causas y a buscar posibles soluciones. Desde la perspectiva aquí adoptada, los problemas de contaminación y de agotamiento de los activos ambientales tienen un origen económico. Ya sea por la ausencia de mercados para bienes ambientales o la indefinición de derechos de propiedad, entre otras razones; la realidad demuestra que día a día rebasamos la capacidad de exigencia de los ecosistemas<sup>4</sup>.

El reciclaje es ampliamente considerado como una opción a incentivar debido a sus beneficios ambientales ya que mitiga la escasez de recursos naturales vírgenes, disminuye los riesgos de enfermedades y de alteración de ecosistemas, reduce la demanda de espacio en tiraderos y generalmente involucra

ahorros en el consumo de energía. Por otra parte, contribuye a reducir el impacto ambiental de la disposición de desechos sólidos, las emisiones a la atmósfera, la generación de lixiviados y los malos olores. Sin embargo, esta actividad tiene también efectos negativos sobre el ambiente, principalmente por la energía usada en la recolección y la clasificación de los residuos, además de que el reprocesamiento y utilización de estos materiales conlleva impactos en el entorno<sup>4</sup>.

El beneficio más reconocido de la actividad de reciclaje es la disminución del uso de materias vírgenes o primas. Este proceso puede implicar también ahorros de energía debido a que la utilización de ciertos materiales vírgenes resulta más intensiva en consumo de energía que el reprocesamiento de materiales reciclados<sup>4</sup>.

Los envases usados, particularmente los que han contenido bebidas, junto con empaques, embalajes y envolturas diversas, constituyen una proporción importante de los residuos sólidos urbanos en México. Además, estos envases se están convirtiendo en un problema percibido como grave por la población y las autoridades, al ser dispuestos por doquier sin ningún control, ensuciando calles, lotes baldíos, lugares de recreación, cauces de los ríos y creando una imagen de suciedad<sup>5</sup>.

A lo largo de los últimos 40 años, los EFT han ido evolucionando en su composición y características para hacerlos menos agresivos con el ambiente. Así por ejemplo, los envases de este material de un litro pesan actualmente 28 gramos, lo que equivale a 20 por ciento menos de lo que pesaban hace veinte años, lo cual significa que se requieren menos recursos y energía para producirlos, almacenarlos y transportarlos<sup>5</sup>.

Estos EFT han sido diseñados, además, con flexibilidad para ajustarse a los diferentes programas comunitarios de tratamiento de desperdicios sólidos, pudiéndose comprimir para fabricar material aglomerado, resistente e impermeable, o bien desagregarse para separar los materiales que los componen,

recuperando el papel para convertirlo de nuevo en pulpa y separando el polietileno con el aluminio<sup>5</sup>.

Asimismo, el cartón laminado que conforma los envases Tetra Pak tiene alto valor calorífico, si se considera que dos toneladas de envases de este tipo equivalen aproximadamente al valor energético de una tonelada de gasolina, por lo cual al desecharse pueden ser empleados como combustible alternativo para recuperar energía. Al ser sometidos a procesos de combustión, el polietileno se convierte en vapor de agua y dióxido de carbono, en tanto que el aluminio se transforma en óxido de aluminio, que es su estado natural en la corteza terrestre<sup>5</sup>.

Los envases producidos con aluminio son muy ligeros, permiten que el producto contenido en ellos tenga larga vida en anaquel y no afectan su sabor o calidad, siendo impermeables a la humedad, a los gases, a la luz y a los olores. Además, los envases de aluminio son fácilmente compactibles cuando se convierten en residuos, lo cual hace ventajoso su reciclaje a través de su fundición y conversión en lingotes que se transforman en láminas de aluminio que vuelve a usarse, con bajo consumo de energía y agua. En los rellenos sanitarios, el aluminio y sus óxidos permanecen inertes, por lo cual no representan riesgos ambientales<sup>5</sup>.

Para producir una tonelada de aluminio se requieren las siguientes cantidades de materia prima y de energía:

- 4,385.63 Kg de bauxita (óxido de aluminio hidratado)
- 510.31 Kg de coque (carbón de piedra o bituminoso coquizado)
- 483.29 Kg de carbonato de sodio anhidro
- 163.60 Kg de alquitrán
- 119.07 Kg de cal

Cantidades variables de metales de aleación, según se use como bote rígido o como lámina o papel de aluminio (de 15 a 5 % de manganeso, trazas de hierro, silicio, zinc, cromo, cobre y/o titanio).

- 217.11 millones de BTU de energía.

Se requiere también dar tratamiento o eliminar lo siguiente:

- 1,646.00 Kg de lodos rojos
- 1,450.86 Kg de dióxido de carbono
- 40.52 Kg de contaminantes del aire
- 394.74 Kg de desechos sólidos

El reciclaje del aluminio produce los siguientes ahorros:

- 95% del consumo de agua
- 95% del consumo de energía
- 95% de contaminantes atmosféricos

En principio, es posible diseñar políticas que eviten una proporción significativa de los problemas generados por los envases y que reduzcan el costo para la sociedad de atenderlos. Desde el punto de vista social, parecería que es más costoso recoger y depositar los residuos, que evitar su generación<sup>3</sup>.

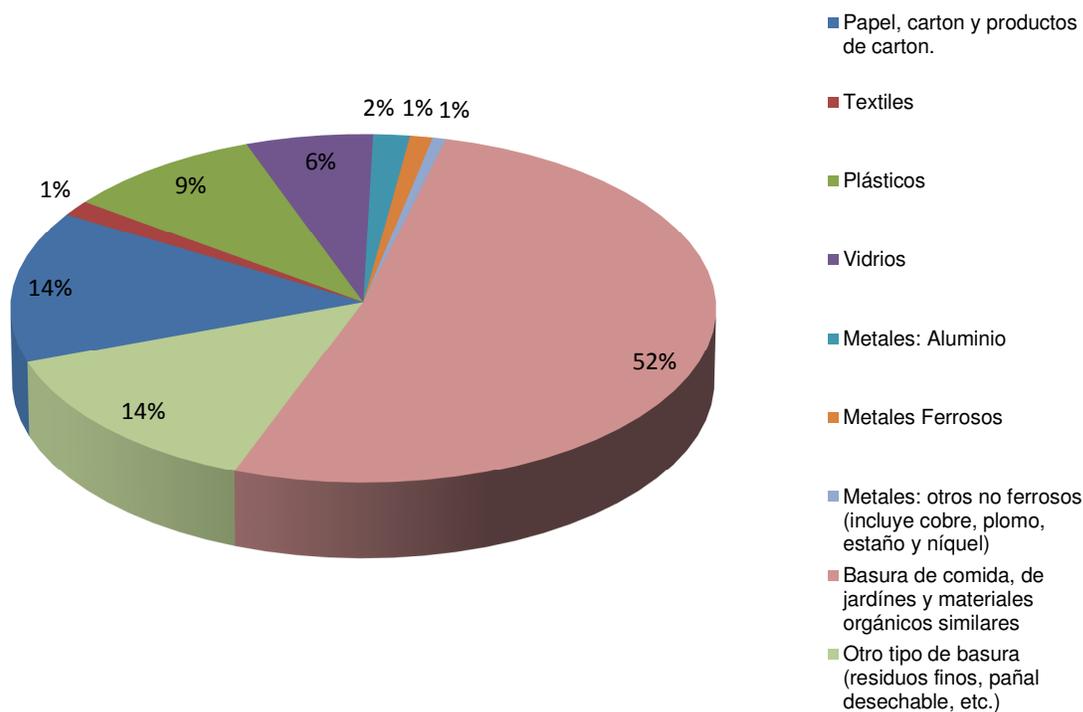
Dado lo anterior, es deseable incidir en las actividades industriales y modificar procesos y productos, particularmente en relación con los envases, de manera que se incrementen los incentivos al reúso y al reciclaje. Por el contrario, las políticas se debería orientar hacia desalentar la disposición final<sup>3</sup>.

#### Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Son los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole<sup>6</sup>.

## Generación de residuos sólidos urbanos RSU.

En la composición de estos residuos (véase Gráfica I), se estima que el 53% son residuos orgánicos biodegradables, 14% papel y cartón, 6% vidrio, 4% plásticos, 3% metales y 1% textiles, mientras que el restante (19%) corresponde a otro tipo de materiales. Sin embargo, a pesar de las posibles ventajas económicas y ambientales que representaría la recuperación de estos materiales, se estima que sólo se recupera para su comercialización entre el 10 y el 12% del total generado y desafortunadamente, en la mayoría de los casos, los residuos se convierten en “basura” debido a que éstos se disponen mezclados en el mismo contenedor o en un mismo sitio con la correspondiente dificultad para su debida recuperación<sup>6</sup>.

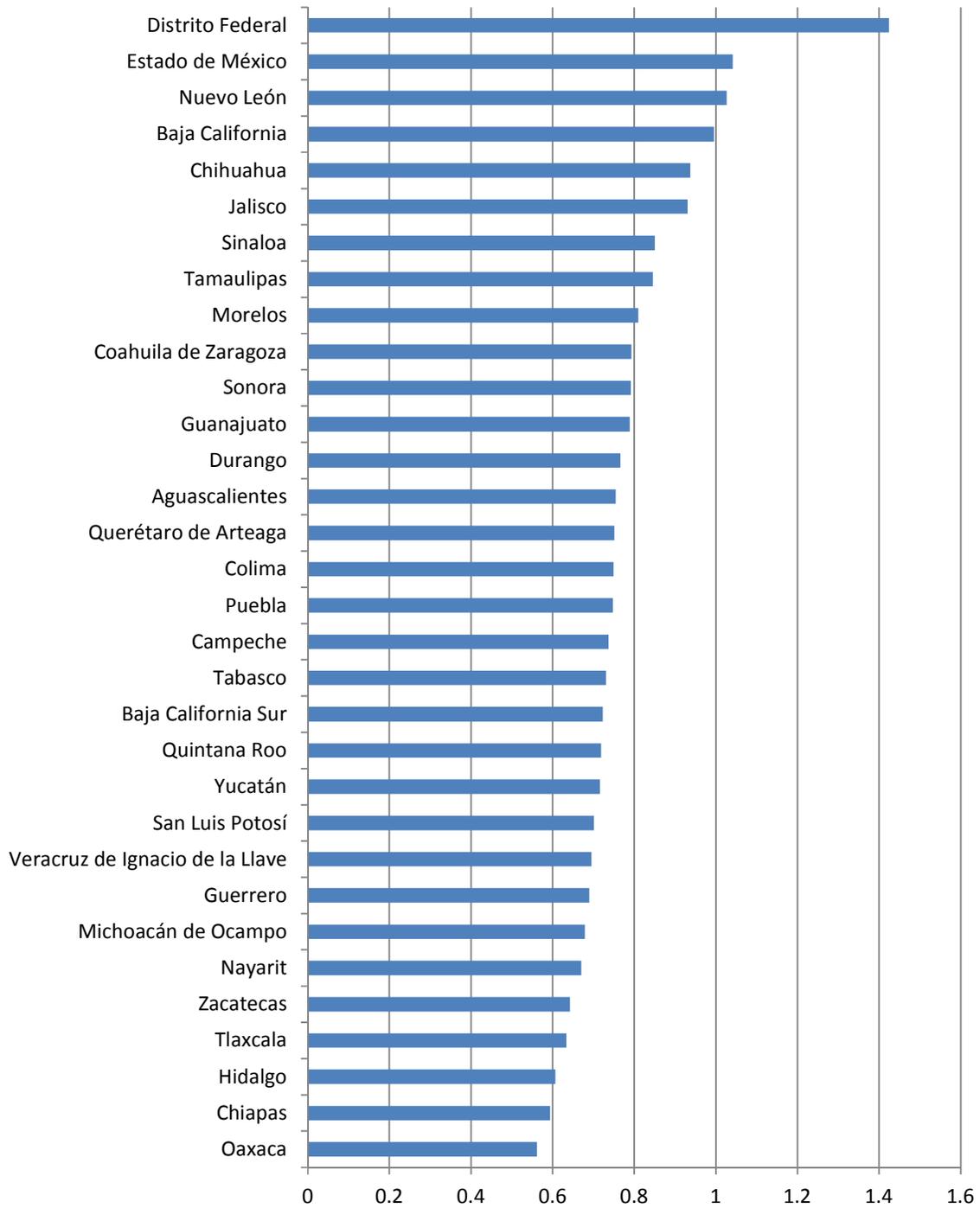


**Gráfica I.** Composición de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), porcentajes de RSU en base a la generación de estos por año.

El análisis ambiental nos indica que el cartón, el papel y los EFT, representan el 14% del volumen de residuos sólidos generados a nivel nacional

(véase Gráfica I). Ocupa el segundo lugar en la producción de envases y embalajes a nivel nacional por debajo de los envases de Poli Tereftalato de Etileno (PET por sus sigla en inglés) y es el material con el consumo per cápita más alto dentro de la industria del envase y embalaje en México. Se estima que en México, cada habitante genera alrededor de 800 gr al día. Que va desde 500 gr. en zonas rurales, hasta cerca de 1.4 Kg en zonas metropolitanas tales como el Distrito Federal, Estado de México, Nuevo León (véase Gráfica II). De esta forma, se calcula que en el país se producen cerca de 100,800 toneladas de “basura” al día, lo que significa cerca de 38 millones de toneladas de residuos al año<sup>6</sup>.

De este modo, la gestión integral de los residuos, que desde luego incluye la separación desde la fuente, representa un importante potencial para la obtención de materiales susceptibles de aprovechamiento en nuevos procesos productivos o para la generación de nuevos productos, con la consiguiente generación de actividades económicas, de nuevas empresas, ingresos y empleos formales que tanto requiere nuestro país, mientras que la inadecuada gestión de los residuos puede representar importantes riesgos para la salud de la población y de los ecosistemas.



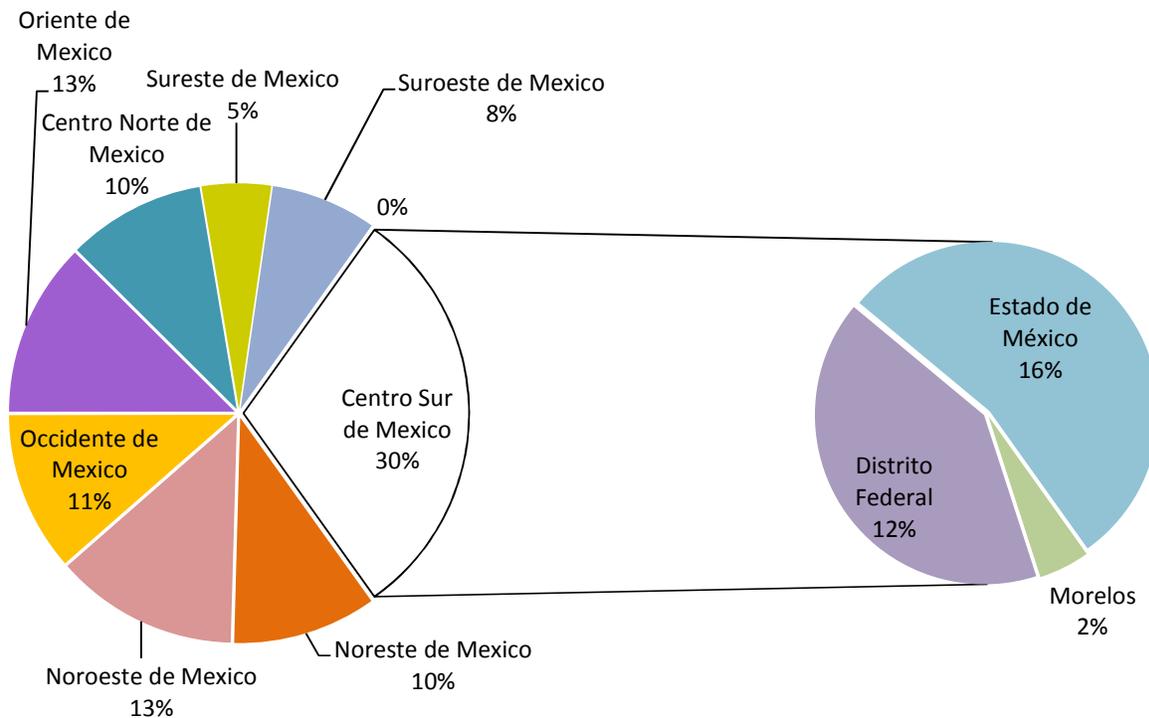
**Gráfica II.** Generación de RSU en Kg por persona por día en cada una de las entidades federativas de nuestro país

En base a la Localización geográfica de las regiones de México se estimaron la producción de RSU (Véase Figura I).



Figura I: Localización geográfica de las regiones de México

- Noroeste
- Noreste
- Occidente
- Oriente
- Centronorte
- Centrosur
- Sureste
- Suroeste



**Gráfica III.** Generación de RSU en porcentaje por región del país

En la Gráfica III se demuestra que el Estado de México ocupa el primer lugar en generador de RSU con 6 millones de Toneladas al año, de los cuales el 14 % son residuos de papel, cartón y envases de papel como lo son los EFT.

En tanto a los EFT, 6 mil unidades de tetrapak que se producen en el país equivalen en promedio a 168 mil toneladas de tetrapak.

Si se pudiera llegar a reciclar el total de envases producidos de tetrapack en México se estaría produciendo 700 toneladas de aluminio por mes y 3 mil toneladas de polietileno mensuales. En México existen 8 empresas recolectoras de EFT, 4 están en el Estado de México, 3 en el Distrito Federal y una en Querétaro, además de 24 Centros de acopio alrededor del país.

Gracias a las empresas recolectoras en nuestro país, las cuales son:

- Fabricación de Papel San José, S.A. de C.V.
- The Junior League of México City, I.A.P.
- REPAK México, S.A. de C.V.
- Ziklum<sup>7</sup>

Se recolectan más de 4360 toneladas de tetrapak equivalentes a tan solo el 2% de la producción, en proyecciones futuras de las empresas antes mencionadas se plantea que se incrementará a 15% la reutilización de estos envases en el 2015 para fines de producción de papel, así como la utilización de el poli-aluminio.

Los beneficios de reciclar EFT son; por cada tonelada que se recicla;

- Se recuperan 750 Kg de papel

Ahorrando

- 3,000 kW de energía
- 26,000 L de agua
- 1,460 kg de combustible
- 2,000 kg de madera descortezada
- 3 m<sup>3</sup> de basura que se deja de enterrar

## Capítulo I. Antecedentes

### 1.1 Composición del Empaque Flexible tipo Tetra Pak® (EFT)

Para la manufactura de los EFT se utilizan tres materias primas: papel, plástico y aluminio.

#### 1.1.1 Papel

Tiene una estructura en base a fibras vegetales de celulosa, las cuales se entrecruzan formando una hoja resistente y flexible. Estas fibras provienen del árbol y según su longitud, se habla de fibras largas, de aproximadamente 3 milímetros, obtenidas de pinos insignes u otras coníferas, o de fibras cortas de 1 a 2 milímetros obtenidas principalmente de eucalipto.

Dependiendo del uso final que se le dará al papel, en la fabricación se utiliza una mezcla de los diferentes tipos de fibras, las que aportaran sus características específicas al producto final<sup>8</sup>.

Las propiedades se pueden agrupar en propiedades mecánicas o de resistencia y propiedades visuales o de presentación.

Una de las principales propiedades mecánicas es la rigidez. Ésta depende de las fibras que forman el papel, ya que un papel producido con mayor contenido de fibra larga será más rígido que aquel fabricado con mayor cantidad de fibra corta. Otras propiedades mecánicas son la resistencia al rasgado, la resistencia superficial y la resistencia a la absorción de agua<sup>9</sup>.

Con relación a las propiedades visuales, se distinguen principalmente la blancura, brillo, tersura del papel.

El grosor y volumen son aspectos significativos en la elaboración del papel; al final, el producto debe soportar los pesos de las cargas, equipaje y los demás usos, manteniendo su forma. Generalmente están compuestos por dos o más capas para mejorar la calidad.

### Gramaje<sup>9</sup>.

En la industria, el papel se mide generalmente por su gramaje, que es el peso en gramos por metro cuadrado del papel expresado: la mayoría del papel utilizado para fabricar envases tiene un gramaje entre 160 y 600 gramos por metro cuadrado.

### Grosor<sup>9</sup>.

El grosor es la distancia entre las dos superficies de la lámina de papel y se mide en micras,  $\mu\text{m}$ . Los envases de papel suelen tener entre 350 y 800  $\mu\text{m}$  de grosor.

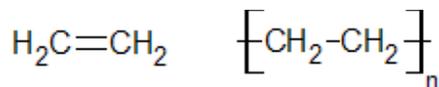
### Densidad y calibre<sup>9</sup>.

La densidad del papel se define como el grado de compactación del material y se mide mediante la cantidad de papel, en kilogramos, que ocupa en un metro cúbico. En la práctica, se sustituye esta característica por el calibre, que expresa la superficie del papel en metros cuadrados por cada 10 kilogramos de peso. Cuanto menor sea la cifra del calibre, mayor es el grosor del papel. En realidad, esta cifra indica la cantidad de hojas de papel, de tamaño 70 x100 (centímetros), que conforman 10 kilogramos. Esto es, 10 kg de «papel calibre 40» están formados por 40 hojas 70 x 100  $\text{cm}^2$ . Son calibres habituales: 4 (pesado), 6, 8, 10 (medio), 12, 25, 35 y 40 (liviano).

#### **1.1.2 Plástico (Polietileno)**

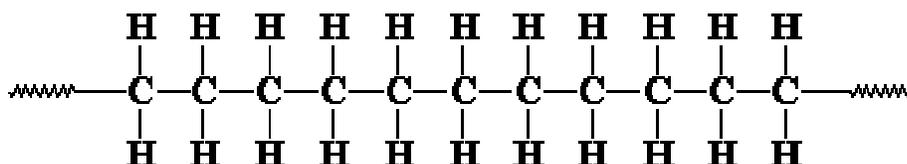
Los polímeros hoy en día están presentes en todas partes, casi el 90% de los materiales sólidos ocupados por el hombre son polímeros, por lo que son ya parte importante en el desarrollo tecnológico actual. El polietileno es probablemente el polímero que más se utiliza en la vida diaria. Este es el polímero que se emplea en las envolturas para empaques de todo tipo. Por ser un material tan versátil, y poseer una estructura muy simple Figura 1.1 a), su comercialización ha sido relativamente rápida.

Una molécula del polietileno no es más que una cadena larga de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono, Figura 1.1 b). Su representación más sencilla es la mostrada en la Figura 1.1 c) y d) , sólo con la cadena de átomos de carbono, de miles de átomos de longitud<sup>10</sup>.

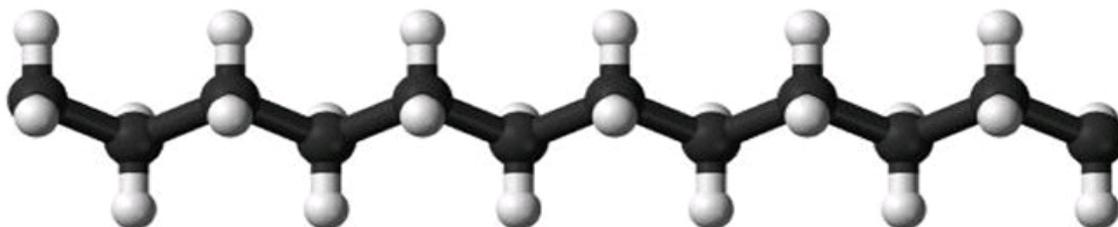


a)

b)



c)



d)

Figura 1.1. a) Etileno (monómero), b) Estructura fundamental del polietileno, c) Cadena de polietileno, d) Imagen en tercera dimensión de la cadena de polímero.

En ocasiones su estructura del polietileno es complicada porque se generan ramificaciones alrededor de la cadena principal. A veces algunos de los carbonos, en lugar de tener hidrógenos unidos a ellos, tienen asociadas cadenas más pequeñas de polietileno. A este fenómeno se le llama ramificación de la cadena. En todo tipo de polímeros, si durante la reacción se extrae un átomo de hidrógeno de la cadena principal, puede generarse una ramificación<sup>11</sup>.

Al extraer un átomo de hidrógeno de un carbono cercano al extremo de una cadena, se forman ramificaciones cortas; mientras que si el átomo de hidrógeno se elimina cerca de la mitad de una cadena, las ramificaciones son largas. Es más probable que se formen ramificaciones cortas que largas porque los extremos de las cadenas son más accesibles<sup>11</sup>.

La ramificación afecta las propiedades físicas del polietileno. Las cadenas no ramificadas se pueden empaquetar mejor que las cadenas ramificadas. En consecuencia, el polietileno lineal llamado polietileno de alta densidad (PEAD) es un plástico relativamente rígido que se usa para producir objetos como articulaciones artificiales de cadera; mientras que el polietileno ramificado o polietileno de baja densidad (PEBD) es un polímero mucho más flexible que se usa para producir bolsas de basura, entre otros objetos<sup>11</sup>.

El polietileno se forma a partir de un monómeros vinílicos; es decir, pequeñas moléculas que contiene dobles enlaces carbono-carbono. En este caso es la molécula de etileno (véase Figura 1.1 a), el polietileno puede tener hasta 200,000 unidades de monómeros incorporados en una gigantesca cadena de hidrocarburos<sup>12</sup>.

Históricamente, la polimerización del etileno se realizaba a alta presión (1000-3000 atm) y a temperatura elevada (100-250 °C) en la presencia de un catalizador como el peróxido de benzoilo, aunque ahora se utilizan con más frecuencia otros catalizadores y condiciones de reacción. La etapa clave es la adición de un radical al enlace doble del etileno<sup>12</sup>.

*Iniciación:* La reacción de polimerización se inicia cuando unos cuantos radicales son generados por el calentamiento de una pequeña cantidad del catalizador peróxido de benzoilo (véase Figura 1.2), rompiéndose el enlace débil O-O. Se añade un radical benzoiloxi al enlace C=C del etileno para generar un radical carbono. Un electrón del enlace C=C se aparea con el electrón impar en el radical benzoilo para formar un enlace C-O, y el otro electrón permanece en el segundo carbono (ver Figura 1.2).

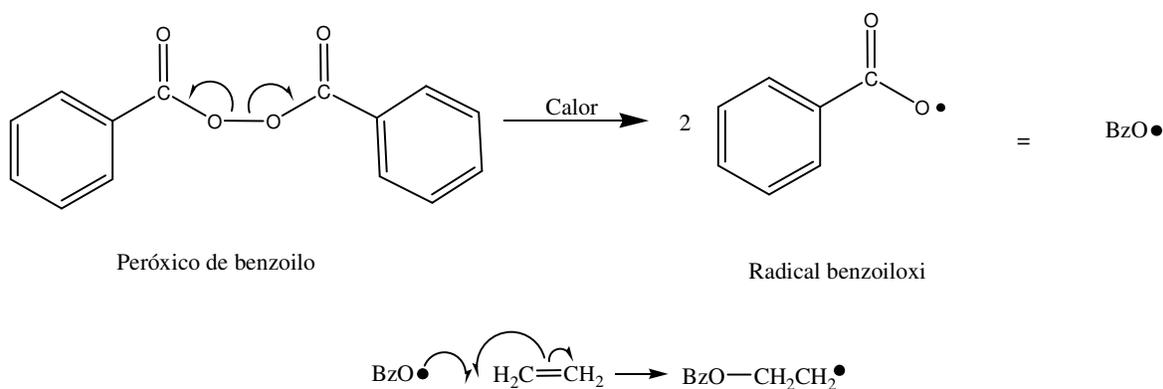


Figura 1.2. Mecanismo de formación de radicales libres<sup>12</sup>.

*Propagación:* La polimerización ocurre cuando se adiciona el radical formado sobre el carbono en la etapa de iniciación, a otra molécula de etileno para producir otro radical: la repetición de cientos o miles de veces de este proceso constituye el crecimiento del polímero (ver Figura 1.3).

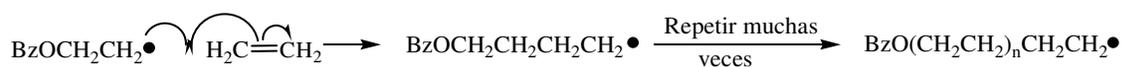


Figura 1.3. Mecanismo de propagación de los radicales libres<sup>12</sup>.

*Terminación:* Se finaliza eventualmente el proceso en cadena por una reacción que consume el radical: la combinación de dos cadenas en crecimiento es una de las reacciones de terminación de la cadena (ver Figura 1.4).



Figura 1.4. Finalización cuando se consume el radical<sup>12</sup>.

### 1.1.2.1 Proceso de producción industrial del polietileno.

El polietileno fue sintetizado por primera vez por el químico alemán Hans Von Pechmann, quien por accidente lo preparó en 1898 cuando calentaba diazometano<sup>13</sup>.

En 1933 fue sintetizado por Reginald Gibson y Eric Fawcett en Inglaterra, quienes trabajaban para los laboratorios de la empresa Imperial Chemical Inc. (ICI)<sup>14</sup>. Esto fue logrado aplicando una presión de aproximadamente 140 MPa y una temperatura de 170°C, sobre un recipiente que contenía etileno y benzaldehído. Sin embargo, la reacción había sido desencadenada por rastros de oxígeno contenidos en el recipiente y no fue posible replicarla con éxito hasta 1935, cuando otro químico de la compañía ICI, Michael Perrin, desarrolló una síntesis industrial reproducible para la síntesis de polietileno de baja densidad<sup>13</sup>.

Posteriormente, se desarrollaron catalizadores para estos procesos. El primer catalizador tuvo como base el bióxido de cromo y fue descubierto en 1951 por Robert Banks y John Hogan en Phillips Petroleum<sup>13</sup>.

Hay dos tipos de polietileno. El PEAD, producido por métodos de baja presión. Una es el método de Phillips<sup>15</sup> a 2 MPa, que opera en disolución de Xileno, a 20 °C y con óxido de cromo como catalizador, dando un producto de máxima densidad. A mayor densidad, mayores resistencias del polímero, sin otro inconveniente que las naturales dificultades de moldeo a causa de la mayor rigidez; es decir, presentan menor flexibilidad (para los esfuerzos mecánicos).

El segundo método de baja presión se lleva a cabo en gran parte por el desarrollado en Alemania en los años 1954 y 1955 por Ziegler, que por ello fue galardonado con el premio Nobel<sup>16</sup>. Empleando catalizadores especiales es posible, a bajas presiones (en este caso 1 MPa) y bajas temperaturas (entre 85°C y 90°C) obtener un producto dotado de unas propiedades de solidez, que no alcanza el polímero producido por otros procedimientos<sup>14</sup>. Cuando se inyecta etileno a una suspensión de etilato de aluminio y éter titánico en un aceite como

disolvente, se polimeriza el etileno con desprendimiento de calor y forma un producto macromolecular de más de 100,000 unidades repetitivas (frente a los 2,000 unidades repetitivas en el método de alta presión).

Un tercer sistema catalítico, basado en metallocenos, fue descubierto en Alemania en 1976 por Walter Kaminsky y Hansjörg Sinn. La catálisis de metallocenos y la catálisis Ziegler, demostraron una excelente flexibilidad en la síntesis de mezclas de eteno y  $\alpha$ -olefinas, sentando las bases de la amplia gama de polietilenos existentes<sup>13</sup>.

### 1.1.2.2 Producción de Polietileno de Baja Densidad (PEBD)<sup>13</sup>

La producción de PEBD a gran escala, que comenzó en los años de 1950, se lleva a cabo en un reactor tipo autoclave o tubular, utilizando un iniciador de radicales libres. Se puede usar un amplio intervalo de iniciadores que consisten principalmente en uno o dos peróxidos, que operan ya sea a altas o bajas temperaturas.

La gran cantidad de calor generada durante la reacción es removida por medio de chaquetas de enfriamiento o por medio de una alimentación de etileno frío. El calor generado se utiliza para generar vapor de baja presión.

Recientemente se ha hecho énfasis en procesos que ahorren energía y materia prima, llevando a cambiar de PEBD a polietileno lineal de baja densidad (PELBD) que ofrece una ventaja en cuanto a rendimiento y costo, sobre el PEBD. Por otro lado, se está incrementando la fabricación de grados de PEBD que contienen ya sea, comonómeros olefínicos como hexeno y octeno o comonómeros polares, ya que ambos extienden el intervalo de propiedades del polímero. Algunos ejemplos de estos comonómeros son el acetato de vinilo, el acetato de butilo y el ácido acrílico.

### **1.1.2.2.1 Proceso industrial de alta presión de PEBD<sup>17</sup>.**

Para la obtención del polietileno de alta presión, es preciso un etileno muy puro. No solamente deben eliminarse las impurezas inorgánicas, como los compuestos de azufre, el óxido de carbono, el anhídrido carbónico y otros, sino también el metanol, el etano, y el hidrógeno que, aunque no tome parte en la reacción de polimerización, actúa como diluyente en el método de alta presión e influye en la marcha de la reacción.

### **1.1.2.3 Producción del polietileno de alta densidad (PEAD)**

El descubrimiento hecho por Ziegler y Natta en los años 50 del siglo XX, de catalizadores capaces de polimerizar etileno a presiones y temperaturas menores a las que se estaban empleando, revolucionó la producción de poliolefinas. Estos catalizadores consisten en derivados de metales de transición: titanio, vanadio o zirconio con compuestos organometálicos de aluminio. El polímero resultante de este nuevo proceso tuvo una estructura más cristalina, así como una mayor densidad. Para diferenciarlo del polietileno producido industrialmente, con una menor densidad, se le llamó polietileno de alta densidad. Casi al mismo tiempo, investigadores en los Estados Unidos descubrieron que catalizadores basados en cromo, óxidos de molibdeno sobre sílice o sílice-alúmina, eran capaces también de polimerizar etileno a temperaturas y presiones menores.

Estos métodos basados en catalizadores, además de mejorar la eficiencia del proceso, controlan la masa molecular del polímero formado. El hidrógeno se emplea comúnmente como un regulador de la masa molecular.

La polimerización en suspensión, en solución o en fase gaseosa se puede utilizar para la fabricación de PEAD. La polimerización en suspensión fue la tecnología utilizada originalmente debido a su flexibilidad. Los procesos en solución son utilizados cuando se requiere producir polímeros de baja masa molecular. La tecnología introducida por Union Carbide y más tarde por otras

compañías, fue la polimerización en fase gaseosa. En este proceso se emplea un catalizador en estado sólido.

#### **1.1.2.3.1 Proceso industrial de baja presión del PEAD<sup>18</sup>.**

En este proceso, el etileno grado polímero, un diluyente y un catalizador, son alimentados de manera continua en un reactor a una presión de 3-4 MPa. La polimerización se lleva a cabo a una temperatura de 85 a 100°C.

Este proceso se conoce frecuentemente como el proceso de forma de partícula, debido a que las partículas del catalizador mejorado de cromo y silicio son suficientemente activas a temperaturas bajas, como para que el polímero precipite, dejando cantidades relativamente pequeñas de polímero disuelto en el diluyente, la viscosidad del diluyente es baja y se mantienen altas concentraciones del polímero en el reactor.

En la Figura 1.5 se presenta un diagrama simplificado para este proceso. El reactor tubular de doble lazo está construido con tubos encaquetados de grueso calibre y fue diseñado por los ingenieros de Phillips para evitar la deposición de partículas. Este reactor también tiene una elevada relación superficie-volumen, lo que facilita la remoción del calor de reacción y permite tiempos de residencia cortos. El impulsor hace que la mezcla de reacción fluya a través de la tubería en un régimen turbulento con una velocidad de 5-10 m/s.

Se utiliza isobutano como diluyente, ya que facilita su separación subsecuente permite trabajar a temperaturas de operación mayores a las que se tendrían si se utiliza otro alcano de mayor masa molecular.

El catalizador es vertido dentro del reactor junto con el diluyente desde el dispositivo de control ubicado en la base del tanque para la mezcla de catalizador. El polímero resultante se extrae de la sección de sedimentación ubicada en la parte inferior del reactor. Esto permite que la suspensión entre al tanque "flash" (de vaporización instantánea) a una concentración de 55-65%, en vez de la que circula en el reactor (30-35%).

El diluyente del efluente del reactor se vaporiza disminuyendo así la presión. El polímero recuperado se “peletiza” directamente sin remover el catalizador.

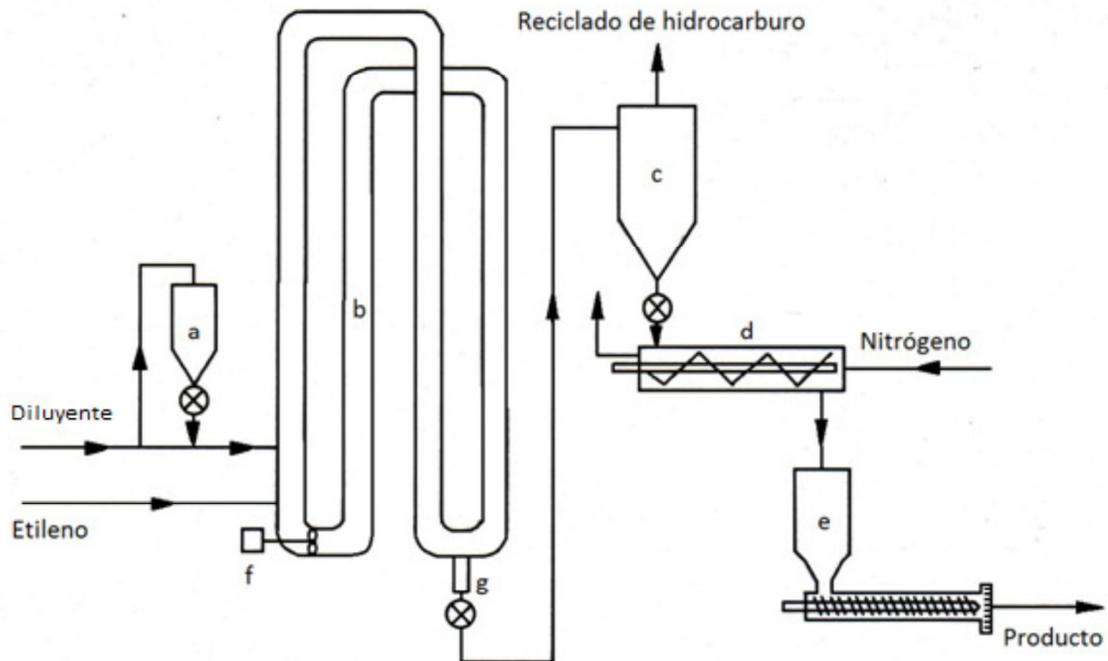


Figura 1.5. Proceso de partícula de Phillips<sup>18</sup>. A) Tolva de catalizador y válvula de alimentación; B) reactor de doble lazo; c) tanque “flash”; d) secador de purga; e) extrusor; f) impulsor; g) Sedimentador.

#### 1.1.2.4 Propiedades del Polietileno

**Propiedades físicas<sup>19</sup>:** El polietileno posee una buena tenacidad y flexibilidad en un amplio intervalo de temperatura. Su densidad decrece bastante rápidamente a temperaturas por encima de la ambiente.

Las propiedades eléctricas del polietileno son excepcionalmente buenas, probablemente próximas a las del politetrafluoretileno para su empleo en alta frecuencia. En secciones gruesas, el polietileno es translúcido debido a su cristalinidad, pero en películas delgadas se logra una buena transparencia.

Se pueden ver en la Tabla 1,2 y 3 las demás características mencionadas

**Tabla 1: Propiedades Físicas<sup>10</sup>.**

Absorción de Agua - en 24 horas ( % )	<0,015
Densidad ( g cm <sup>-3</sup> )	0,92
Índice Refractivo	1,51
Índice de Oxígeno Límite ( % )	17
Inflamabilidad	Si
Resistencia a los Ultra-violetas	Aceptable

**Tabla 2: Propiedades Eléctricas<sup>10</sup>.**

Constante Dieléctrica @1MHz	2,2 - 2,35
Factor de Disipación a 1 MHz	$1 - 10 \times 10^{-4}$
Resistencia Dieléctrica ( kV mm <sup>-1</sup> )	27
Resistividad Superficial ( Ohm/sq )	$10^{13}$
Resistividad de Volumen a ^C ( Ohm·cm )	$10^{15} - 10^{18}$

**Tabla 3: Propiedades Mecánicas<sup>10</sup>.**

Alargamiento a la Rotura ( % )	400
Dureza - Rockwell	D41 - 46 - Shore
Módulo de Tracción ( GPa )	0,1 - 0,3
Resistencia a la Tracción ( MPa )	5 - 25
Resistencia al Impacto Izod ( J m <sup>-1</sup> )	>1000

**Propiedades químicas<sup>19</sup>:** el polietileno es químicamente inerte. No se disuelve en ningún disolvente a temperatura ambiente, pero líquidos tales como el benceno y el tetracloruro de carbono, que son disolventes suyos a temperaturas superiores, los hacen hincharse ligeramente. Tiene una buena resistencia a los ácidos y álcalis. A 100°C no es afectado a 24 horas por el ácido sulfúrico o el clorhídrico, pero el ácido nítrico concentrado lo degrada. Se utiliza frecuentemente como recipiente para ácidos, incluido el fluorhídrico.

El polietileno envejece expuesto a la luz y al oxígeno con pérdida de resistencia, alargamiento y resistencia al desgarre. Probablemente el punto de ataque son los hidrógenos terciarios de la cadena en los puntos de ramificación. Los estabilizadores retardan la deterioración, pero solo unos pocos son suficientemente compatibles con el polímero para tener un efecto notable. Se produce también en el polímero un cierto entrecruzamiento cuando se calienta o se trabaja a temperaturas elevadas. Pocos plastificantes u otros aditivos son compatibles con el polietileno en cantidades mayores que el 1%.

También existen otras propiedades que se describen en las Tablas 4, 5 y 6

**Tabla 4: Propiedades Térmicas<sup>10</sup>.**

Calor Específico ( J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )	1900
Coeficiente de Expansión Térmica ( x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	100 - 200
Conductividad Térmica a 23°C ( W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0,33
Temperatura Máxima de Utilización ( °C )	50-90
Temperatura Mínima de Utilización ( °C )	-60
Temperatura de Deflección en Caliente - 0.45MPa ( °C )	50
Temperatura de Deflección en Caliente - 1.8MPa ( °C )	35

**Tabla 5: Propiedades para películas de PEBD<sup>10</sup>.**

Alargamiento a la Rotura	%	100 - 700
Factor de Disipación @1 MHz		0,0003
Permeabilidad al Agua @25C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	68
Permeabilidad al CO <sub>2</sub> @25C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	9,5
Permeabilidad al Hidrógeno @25C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	7,4
Permeabilidad al Nitrógeno @25C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	0,73
Permeabilidad al Oxígeno @25C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	2,2
Resistencia Dieléctrica (25 $\mu\text{m}$ grosor)	kV mm <sup>-1</sup>	200
Resistencia al Desgarro Inicial	g $\mu\text{m}^{-1}$	1,2 - 10,3
Temperatura de Sellado en Caliente	°C	120 - 204

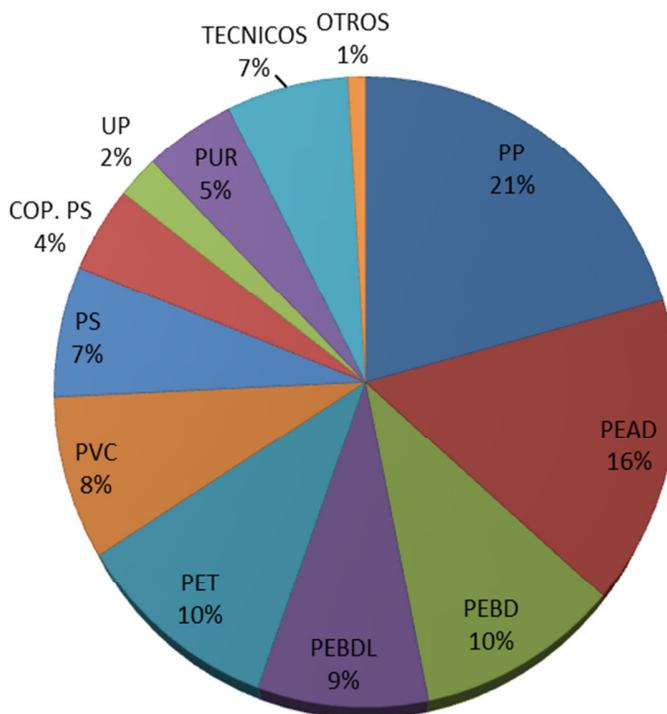
**Tabla 6: Resistencia Química<sup>10</sup>.**

Ácidos - concentrados	Aceptable
Ácidos - diluidos	Buena
Álcalis	Buena
Alcoholes	Buena
Cetonas	Buena
Grasas y Aceites	Mala
Halógenos	Mala
Hidrocarburos Aromáticos	Mala

**1.1.2.5 Producción en el mercado de polietileno en México<sup>20</sup>.**

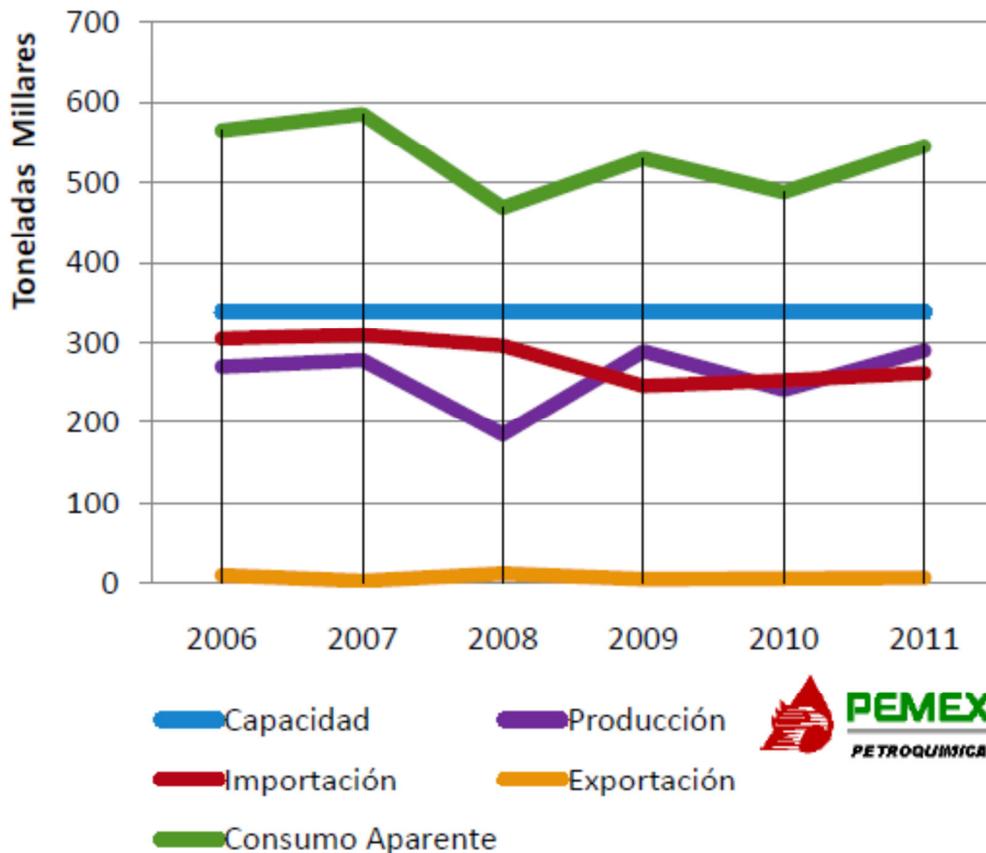
En la Gráfica 1.1 se encuentra la segmentación por tipo de plásticos en el 2011, donde se demuestra que el polietileno de alta densidad y de baja densidad se encuentran en el 2do y 4er lugar en consumo aparente por año, solo por debajo del polipropileno y el poli tereftalato de etileno, lo cual nos indica una alto consumo por lo cual se tiene que reutilizar para que se reduzcan estas cifras.

Plástico	Consumo Aparente Ton/año	Porcentaje
PP	1,102,000	21%
PEAD	836,000	16%
PET	555,000	10%
PEBD	545,000	10%
PEBDL	455,000	9%
PVC	442,200	8%
PS	356,000	7%
TECNICOS	348,000	7%
PUR	257,700	5%
COP. PS	236,000	4%
UP	118,000	2%
OTROS	49,100	1%
TOTAL	5,300,000	100%



Gráfica 1.1. Segmentación por tipo de Plástico en 2011 en México

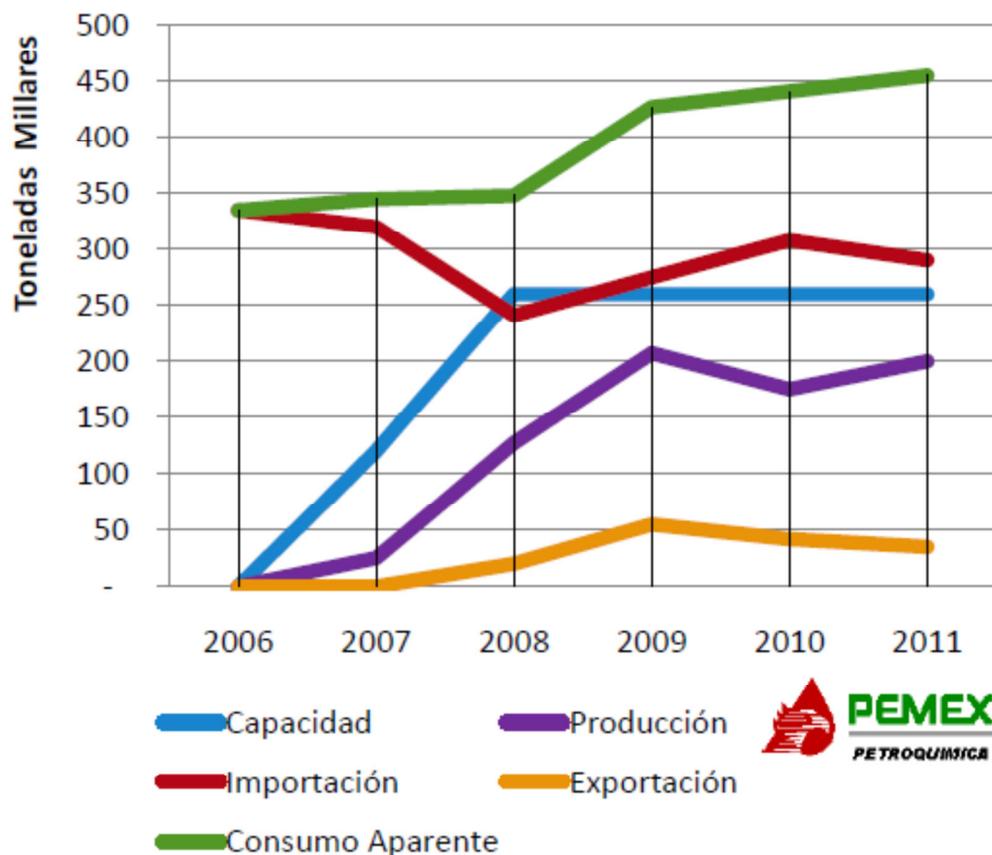
La Gráfica 1.2 correspondiente al consumo aparente del PEBD en el periodo 2006-2011 en nuestro país, donde se muestra que la producción local es inferior en las Importaciones en los años 2006, 2007, muy superior en el 2008 y 2010; en los años 2009 y 2011 se importó menor cantidad y aumentó la producción. Esta gráfica nos dejan ver que hay una oferta local escasa, además de que los precios aumentan, las importaciones se deben a que hay un incremento de capacidad de transformación en las áreas de envases, los cuales consideran las películas, botellas, cajas y pared delgada, de consumo en artículos para el hogar en la construcción como lo son las tuberías, además del aumento de oferta en el PEBD reciclado.



Gráfica 1.2. Polietileno de Baja Densidad<sup>20</sup>.

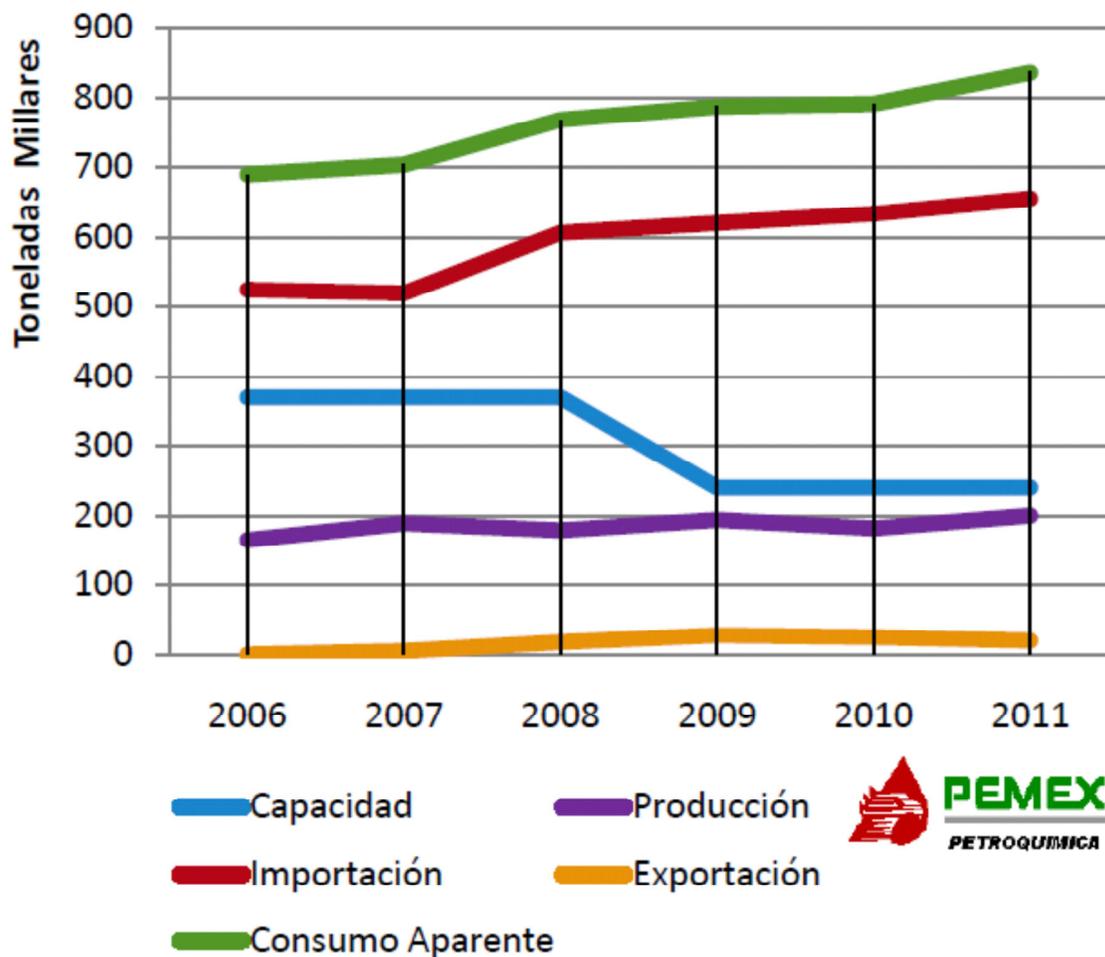
La Gráfica 1.3 establece el consumo aparente del polietileno lineal de baja densidad, en donde se ve que en el año 2006 no se producía esta clase de polietileno y prácticamente toda las importaciones eran para el consumo, después del 2007 hasta el 2009 aumentó la producción y disminuyeron las importaciones, pero en el 2010 aumentaron las importaciones y disminuyo la producción, ya en el 2011 aumentó la producción y disminuyeron las importaciones, pero como se puede ver en la Gráfica 1.3 prácticamente se importaba más del doble de lo que se producía en México, lo cual nos dice que la oferta local era insuficiente y había una alta disponibilidad extranjera. El aumento en la producción, excepto en el 2010 se generó por la diferencia en los precios entre el polietileno de baja densidad y el polietileno lineal de baja densidad los cuales son mínimos, y el aumento en el consumo aparente se debió al incremento de capacidad de

transformación en la industria del envase como lo fueron las películas multicapas y los empaques inteligentes, en el consumo de artículos para el hogar, en la industria agrícola para películas de invernadero y acolchados.



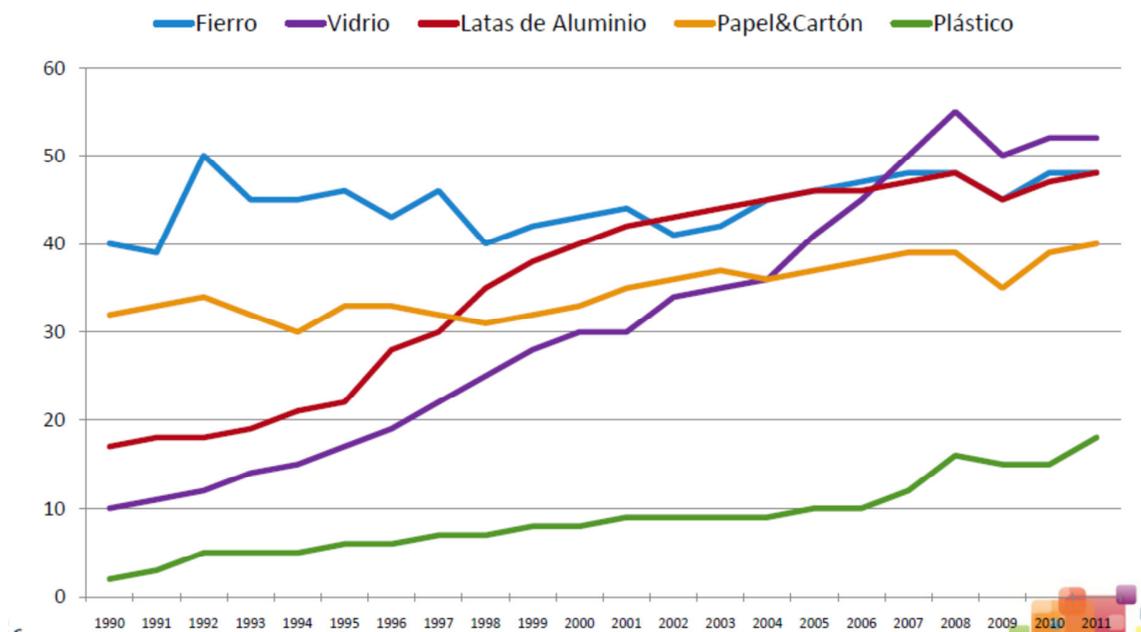
Gráfica 1.3. Consumo Aparente del polietileno lineal de baja densidad<sup>20</sup>.

La Gráfica 1.4 describe el consumo aparente del polietileno de alta densidad, en donde se importó más del doble de lo que se produjo además de que en el 2009 se disminuyó la capacidad de producción y aumentaron aún más las importaciones esto nuevamente se debe a que se tuvo una oferta débil, incrementos de capacidad de transformaciones en envases, consumo de artículos para el hogar y tuberías. Se exporta muy poco.



Gráfica 1.4. Consumo Aparente del polietileno de alta densidad<sup>20</sup>.

La Gráfica 1.5 comprueba como a lo largo de más de 20 años el reciclado del plástico ha ido en aumento y prácticamente se puede comparar con otros materiales como lo son el fierro, vidrio, latas, papel y cartón. En el año 1990 menos del 5% de plástico se reciclaba y hasta el 2011 el 18% de plástico se recicla, es un gran paso para la cultura de reciclado y se espera que en los siguientes años estas cifras sigan aumentando.



Gráfica 1.5. Reciclado de materiales como porcentaje del consumo en México 1990-2011<sup>20</sup>.

### 1.1.3 Aluminio

Símbolo Al. Elemento metálico de color blanco-plateado, brillante, perteneciente al grupo 3 (IIIB) del sistema periódico, el metal es muy reactivo pero se encuentra protegido por una capa fina transparente de óxido que se forma rápidamente al aire. El aluminio y su óxido son anfóteros. El metal se extrae por electrólisis de bauxita purificada ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); actualmente se usa una celda de Hall-Heroult, pero se están desarrollando otros métodos electrolíticos, incluyendo la conversión de bauxita con cloro y la posterior hidrólisis del cloruro fundido. El aluminio puro es blando y dúctil, pero se puede aumentar su dureza por métodos mecánicos (extrusión, laminado,...). Se preparan muchas aleaciones de aluminio con cobre, manganeso, silicio, zinc y magnesio. Es ligero, fuerte (aleado), resistente a la corrosión y buen conductor eléctrico (62% de la conductividad del cobre), por lo que tiene múltiples aplicaciones entre las que se incluyen la fabricación de vehículos y aviones, la construcción de ventanas, puertas y la fabricación de cables de alta tensión. Aunque es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre (8.1% en peso) no fue aislado hasta 1825 por H.C. Oersted (1777-1851)<sup>21</sup>.

#### 1.1.3.1 Proceso de producción del aluminio.

La metalurgia del aluminio está condicionada por su especial carácter electroquímico. Se manifiesta este en la gran afinidad del aluminio por los no metales, como el oxígeno y el cloro, determinando su notoria posición electronegativa en la serie de potenciales electroquímicos de los elementos (Tabla 7). Este es el motivo de que no fue posible, en un principio, aplicar al aluminio los mismos procesos carbotérmicos a partir de sus óxidos, que ya se emplean con metales ordinarios clásicos, como cobre, estaño, hierro, plomo, y zinc; principalmente por las muy altas temperaturas (sobre 2000 °C) requeridas. Actualmente no se vislumbran perspectivas de aplicar este método habitual en este caso, pues las condiciones físicas y químicas del sistema Al-O-C, totalmente desfavorables, impiden la viabilidad económica del mismo. Por ello, los primeros

investigadores se vieron forzados a buscar otros procedimientos para su obtención<sup>22</sup>.

**Tabla 7. Entalpias de formación  $-\Delta H^0_{298}$  y potenciales  $E_0$ , respecto al electrodo patrón de hidrógeno en disolución acuosa<sup>22</sup>.**

Elemento	Óxido	$-\Delta H^0$ (KJ/peso fórmula) <sup>1)</sup>	Cloruro	$-\Delta H^0$ (KJ/peso fórmula) <sup>1)</sup>		$E_0$ (Volt) <sup>2)</sup>
Ca	CaO	634	CaCl <sub>2</sub>	796	Ca/Ca <sup>++</sup>	-2.76
Mg	MgO	601	MgCl <sub>2</sub>	642	Mg/Mg <sup>++</sup>	-2.38
Al	1/3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	558	2/3 AlCl <sub>3</sub>	470	Al/Al <sup>+++</sup>	-1.70
Zn	ZnO	348	ZnCl <sub>2</sub>	416	Zn/Zn <sup>++</sup>	-0.76
Fe	1/3 F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	275	2/3 FeCl <sub>3</sub>	266	Fe/Fe <sup>+++</sup>	0.04
Cu	CuO	156	CuCl <sub>2</sub>	206	Cu/Cu <sup>++</sup>	0.34

1) Valores de  $-\Delta H^0$ : Barin, Knacke, Kubasschewski, Thermochem, properties of inorg. Substance, Springer 1973/1977

2) Valores de  $E_0$ : Handbook of chem. And Phys. 53. Aufl. CRC-Press, 1972/73

En la segunda mitad del siglo pasado fue posible obtener, por vía química, en Francia, pequeñas cantidades de aluminio por reducción del cloruro aluminico-sódico. El procedimiento fue desarrollado por Saint-Claire Deville, basándose en los trabajos preparatorios de Oersted en 1825 y Wöhler en 1827, 1845. Saint-Claire Deville demostró también, en 1854, la posibilidad de obtener el metal por reducción electroquímica del cloruro de aluminio en cloruro fundido. La obtención, a nivel industrial del aluminio tuvo lugar hacia finales del siglo pasado, una vez que la invención del dinamo, por Siemens en 1866, supuso la creación de condiciones apropiadas para la realización técnica de la electrólisis. En 1886 presentaron Heroult en Francia y Hall, en EE.UU. independientemente de aquel, patentes que describían el principio fundamental de la técnica electrolítica actual para la

obtención del aluminio. Casi al mismo tiempo, en 1887 y 1892, el austriaco Bayer obtuvo una patente alemana para un procedimiento de obtención del óxido de aluminio puro a partir de la bauxita, necesario para la electrólisis. El método representa en la actualidad la base fundamental de la producción industrial del óxido.

El aluminio se obtiene hoy, en casi todo el mundo, por un proceso en dos fases (ver Figura 1.6) en la fabricación de óxido se aísla el óxido de aluminio puro de la materia prima. En general, con pocas excepciones, se obtiene el óxido a partir de la bauxita por el método de Bayer, disolviendo la materia prima con sosa cáustica y precipitando el hidróxido de aluminio de la disolución, mediante cristalización provocada. La obtención del metal tiene lugar después, por la electrólisis del óxido puro disuelto en una fusión de criolita, según el principio de Hall-Heroult.

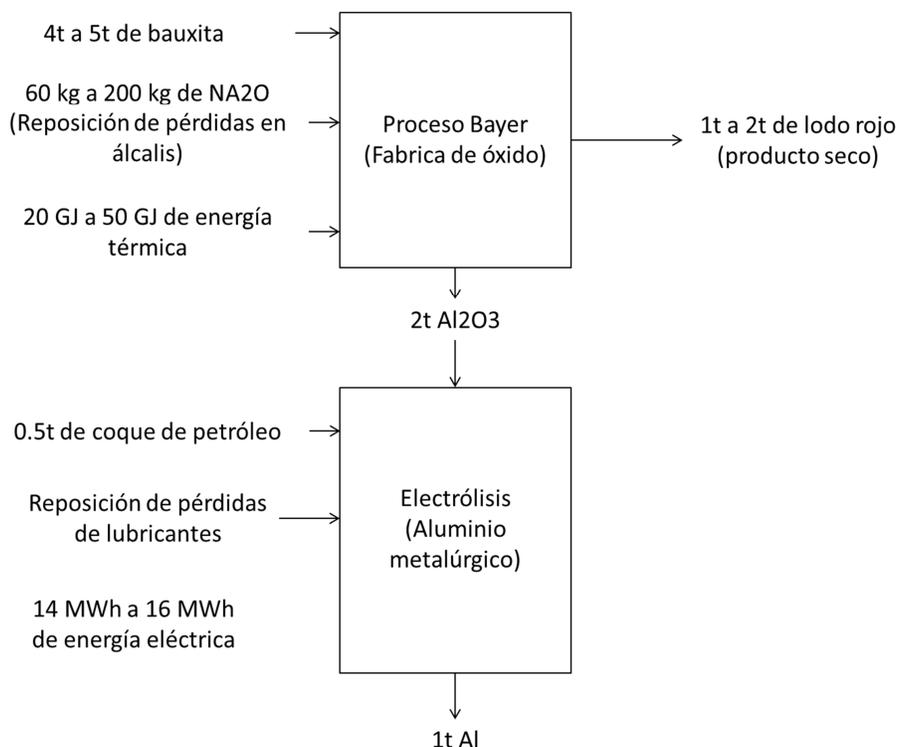


Figura 1.6. Sustancias y esquema de proceso para la producción del aluminio<sup>22</sup>.

### 1.1.3.1.1 Obtención del óxido de aluminio (Proceso Bayer)

A causa de la abundancia con que aparece el elemento en la corteza terrestre, en forma de óxido de silicato en sus minerales, se dispone de un potencial de materia prima prácticamente inagotable. Actualmente, el mineral de partida es casi exclusivamente la bauxita, con una riqueza en más del 20% al 30 de aluminio.

Las bauxitas son productos de erosión, ricos en aluminio, procedentes de rocas madres silicato-luminicas. Están constituidas por una mezcla inicial, formada por consolidación de hidróxidos de aluminio. La composición química y mineralógica, así como las características físicas de las bauxitas correspondientes a distintos yacimientos (véase Tabla 8).

**Tabla 8. Composición típica de bauxitas<sup>22</sup>.**

(datos en porcentaje de masa)

Procedencia	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Pérdida por calcinación	Minerales de aluminio	
							Principal	Acompañante
Weipa (Australia)	55	10	5	2.5	trazas	25	Hidrargilita (Al(OH) <sub>3</sub> )	Bohemita Caolinita
Eleusis (Grecia)	51	30	2	2.5	2	12	Bohemita (AlOOH), Diasporonita	Caolinita

El proceso de Bayer para la obtención de óxido de aluminio a partir de la bauxita, es un procedimiento hidrometalúrgico de separación y extracción muy eficaz y selectivo. El principio en que se basa, con desarrollo cíclico del mismo, es la extracción del hidróxido de aluminio de la bauxita, a elevadas temperaturas, la separación del residuo sólido (lodo rojo) una vez enfriada la suspensión, la

precipitación parcial del hidróxido de aluminio a partir de la lejía de aluminato sobresaturada mediante cristalización germinal provocada, y retorno de la lejía tras la separación de hidróxido cristalizado.

El proceso Bayer<sup>22</sup> es el principal método industrial para producir alúmina (es un material de color blanco tiza de consistencia similar a la arena fina) a partir de bauxita. Aunque las condiciones del proceso son influenciadas por el tipo de bauxita usada, hay 5 etapas principales en todas las plantas. Las etapas de dicho proceso son:

#### 1 - Preparación de la bauxita.

El primer paso en la planta de alúmina es la reducción del tamaño de partícula de la bauxita, para incrementar la superficie de reacción y facilitar su manejo, se realiza a través de una trituración a partir de diferentes trituradores como de mandíbula, de rodillo, de martillo y de impacto.

#### 2 - Digestión.

Se adiciona sobre la bauxita hidróxido sódico, que estará a 180°C y altas presiones para formar así una solución enriquecida en aluminato sódico, de acuerdo a las reacciones siguientes:

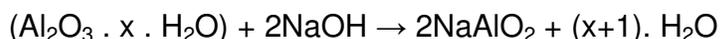
- Para el monohidrato (Proceso Bayer Europeo):



- Para el trihidrato (Proceso Bayer Americano):



- De forma general:



#### 3 - Dilución y separación de residuos.

Al final de la digestión, la suspensión que abandona el último digestor que contiene la solución de aluminato, arenas y lodos rojos (partículas finas), está a una temperatura por encima de su punto de ebullición a presión atmosférica, de manera que se pasa a través de un sistema de enfriamiento por expansión en el cual ocurre una despresurización en forma escalonada, hasta la presión atmosférica y una disminución de la temperatura hasta aproximadamente 105-100°C. El vapor generado es enviado a los intercambiadores de calor para calentar el licor fuerte suministrado a las áreas de digestión y molienda.

Este proceso se lleva a cabo en tres etapas:

i) *Desarenado.* Donde la pulpa que proviene de la digestión se somete a la separación de los lodos y arenas que contiene. Las arenas separadas en la operación anterior son pasadas a través de clasificadores helicoidales de deslicorización y posteriormente lavadas. En cuanto a los lodos son enviados a tanques almacenadores para la alimentación de los espesadores. Es en estos tanques, donde se adiciona el agente floculante que va a facilitar el proceso de sedimentación en los espesadores.

ii) *Sedimentación, lavado y deshecho de lodos rojos.* La sedimentación se lleva a cabo en tanques espesadores, y el lodo rojo depositado en el fondo de éstos, es removido continuamente por un sistema de rastrilleo. Este lodo rojo saliente por la parte inferior de los espesadores, es lavado con el fin de recuperar el hidróxido de sodio y el licor que contiene alúmina disuelta, produciéndose simultáneamente un lodo que ha de ser desechado, mientras que el agua de lavado es enviada al área disolución.

iii) *Filtración de seguridad.* Las partículas finas en suspensión deben ser separadas, de lo contrario contaminarían el producto, y ello es logrado mediante una filtración de seguridad. El proceso se realiza por medio de filtros a presión "Kelly". Una vez que la solución pase a través de esta filtración, es enviada a una sección de enfriamiento por expansión instantánea, donde se le confiere al licor la

temperatura requerida para la precipitación 50 o 70°C, según el tipo de proceso Bayer Europeo o Americano respectivamente

#### 4 – Precipitación

A pesar de bajar la temperatura del licor, es difícil que se produzca una precipitación espontánea. Se precisa de siembra de cristales de hidrato, generalmente fino y en cantidad controlada, De esta manera, se puede conseguir la granulometría deseada. La reacción de precipitación es la siguiente:



#### 5 – Calcinación

El hidrato lavado se somete a secado y calcinación. El secado se consigue aprovechando los gases calientes del calcinador y, una vez seco el mismo, se pone en contacto a alta temperatura (900-1200°C) en un horno. De esta forma se obtiene el producto final, la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). La reacción es la siguiente:



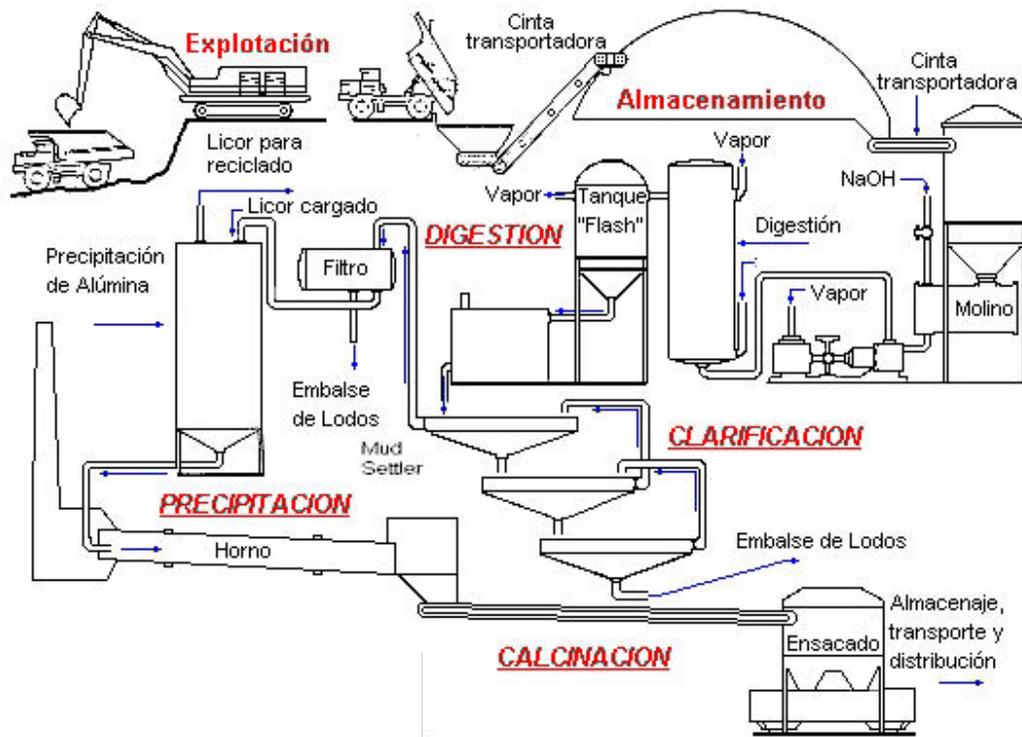


Figura 1.7. Proceso Bayer para la producción de alúmina<sup>23</sup>.

#### 1.1.3.1.2 Obtención del aluminio: el proceso Hall-Hérout<sup>24</sup>.

La base de todas las empresas productoras de aluminio primario es el proceso Hall-Hérout, inventado en 1886. En este proceso, la alúmina se disuelve en baño electrolítico de criolita fundida ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), en un tanque de acero forrado con carbón o grafito. Se hace pasar una corriente eléctrica a través del electrolito a bajo voltaje, pero de intensidad muy elevada, normalmente 150,000 A. la corriente eléctrica fluye entre un ánodo de carbón (positivo) y un cátodo (negativo), constituidos por la capa de carbón o de grafito que cubre el interior de la celda electrolítica. Como consecuencia se deposita aluminio fundido de la celda, sifoneándose periódicamente a un horno de fundición. Una fundición típica de aluminio está constituida por unas 300 celdas Hall, las cuales producen unas 125.000 toneladas de aluminio al año. Sin embargo, algunas fundiciones de última generación son capaces de producir entre 350,000 a 400,000 toneladas.

Como promedio se requiere 15.7 kWh de electricidad para producir un kilogramo de aluminio a partir de alúmina. El desarrollo tecnológico ha conseguido reducir progresivamente el consumo a este valor en comparación con 21 kWh requeridos en los años 50.

La mayoría de las fundiciones producen aluminio del 99.7 % de pureza, que es aceptable para la mayor parte de las aplicaciones. Sin embargo, para algunas aplicaciones especiales se requiere aluminio de alta pureza (99.99%). La pequeña diferencia en el grado de pureza entre el aluminio de calidad normal y el aluminio súper puro se traduce en cambios significativos en las propiedades del metal.

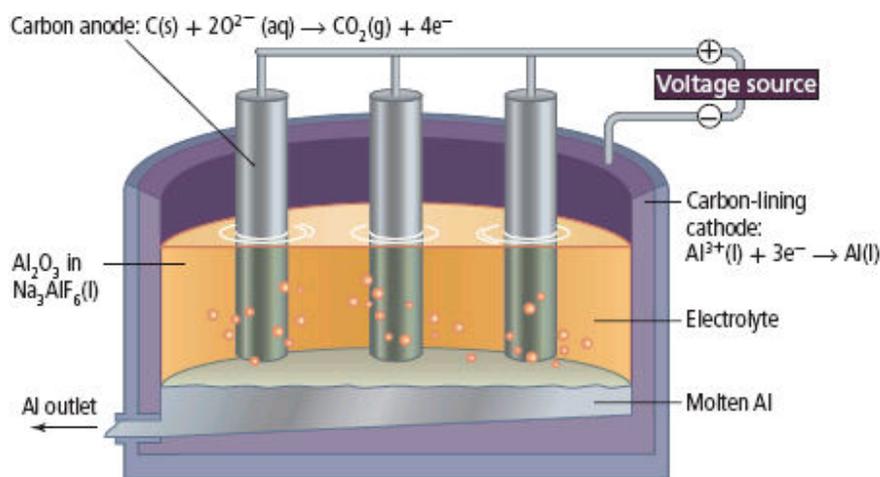


Figura 1.8. Celda Hall-Héroult<sup>25</sup>.

Alrededor del 25% de la producción de aluminio metálico se utiliza en la industria de la construcción, con menores proporciones destinadas en la construcción de aeronaves, camiones y vagones de ferrocarril de pasajeros 18%, recipientes y embalaje 17%, y líneas de energía eléctrica 14%.

Debido a que la extracción del aluminio consume tanta energía y a que su producción tiene tantas implicaciones de carácter ecológico, el reciclaje del aluminio es una empresa que merece particularmente la pena<sup>26</sup>.

### 1.1.3.2 Propiedades del aluminio

El aluminio es un metal extraordinariamente dúctil y maleable, pudiendo llegar a elaborarse láminas del espesor de un cabello humano, que se presenta en forma de rollo. El proceso de enrollado cambia las características del metal, haciéndolo menos brillante y más dúctil, también puede ser extrusionado, calentándolo a 500°C y forzándolo a pasar a través de un troquel. Al mismo tiempo puede ser forjado y ser empleado en aviación y maquinaria sometida a condiciones de trabajo extrema. Se puede soldar, pegar, atornillar o grapar, doblar y moldear. Puede molerse y torcerse en un torno. Sus propiedades pueden modificarse mediante calentamiento o procesos mecánicos, incluso su apariencia puede modificarse mediante tratamientos superficiales como baños electrolíticos o recubrimientos. Se puede elaborar polvo de aluminio, o escamas, o en pasta, burbujeando gas a presión en aluminio fundido. Estos productos se utilizan en la industria de los explosivos, en combustibles de cohetes, en la metalurgia, compuestos químicos, tintas, y en materiales de decoración. Los compuestos químicos de aluminio son importantes en la depuración de agua, fabricación de papel, materiales de relleno, y compuestos farmacéuticos.

La resistencia del aluminio depende de su pureza, el aluminio con una pureza de 99.996% supera tensiones de hasta 49 MPa y algunas aleaciones de aluminio llegan hasta los 700 MPa. Quizá la propiedad más importante del aluminio es su baja densidad. El aluminio pesa aproximadamente la tercera parte del acero. Otras propiedades importantes es la resistencia a la corrosión. También es una excelente conducción de la corriente eléctrica. La industria alimenticia también utiliza aluminio en grandes cantidades, sobre todo en la fabricación de envases<sup>24</sup>.

En la Tabla 9 se muestran propiedades físicas y mecánicas del aluminio

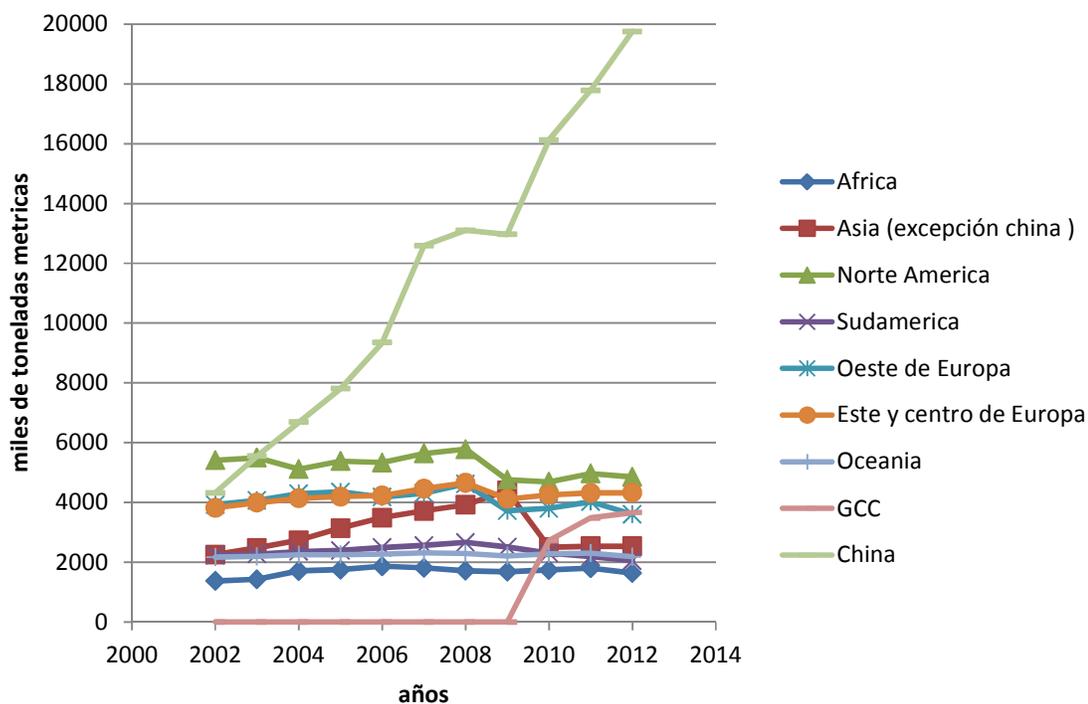
**Tabla 9. Propiedades Físicas y mecánicas del Aluminio**

Físicas		
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	2700
Punto de fusión	°C	660
Conductividad eléctrica	m/(Ω mm <sup>2</sup> )	35 a 38
Conductividad térmica	W/(m*K)	80 a 230
Mecánicas		
Dureza	Escala de Mohs*	2-3-4
Límite de tracción	MPa	160 a 200

- Los valores 2-3-4 significa que se puede rayar con la uña, con más dificultad con una moneda de cobre y finalmente con un cuchillo de acero, respectivamente.

### 1.1.3.3 Mercado del aluminio en México.

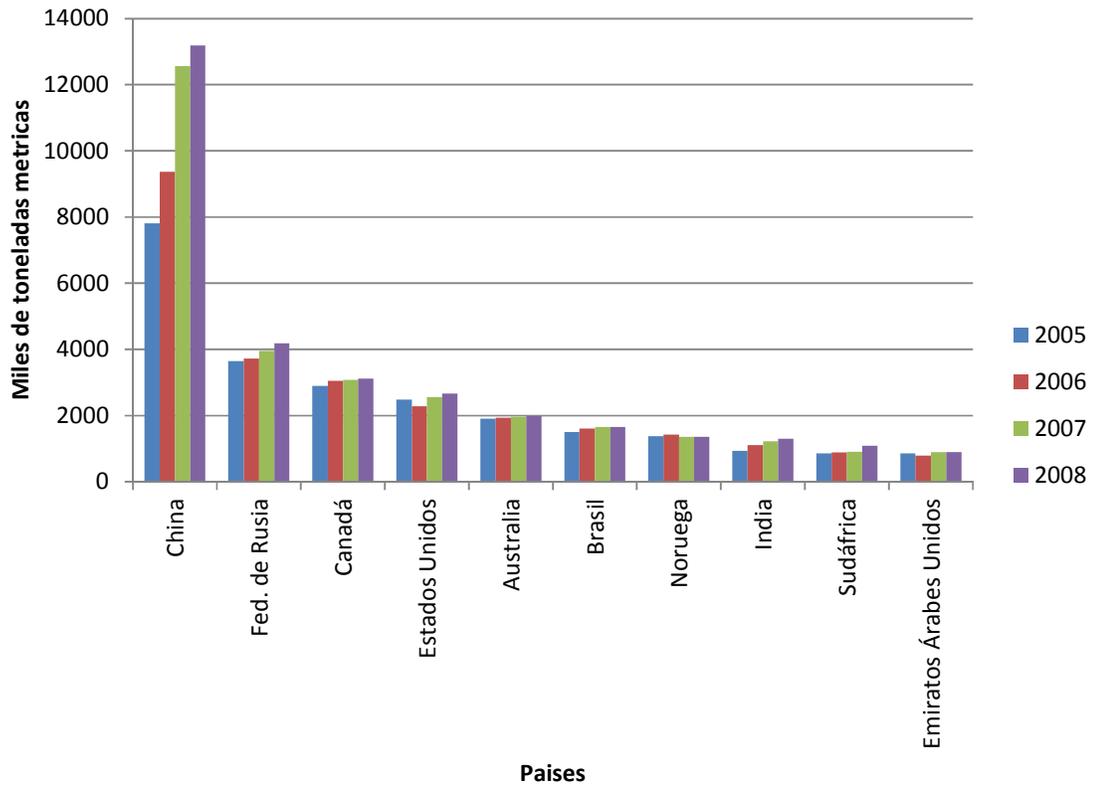
La producción de aluminio en el mundo ha ido en aumento (véase Gráfica 1.6).



Gráfica 1.6. Producción de 2002 al 2012 de aluminio en todo el mundo<sup>27</sup> en miles de toneladas.

China<sup>28</sup> es el máximo productor de aluminio a nivel mundial, mientras que los restantes están en promedio entre 200 mil toneladas métricas y 600 mil toneladas métricas, se puede apreciar una disminución en el año 2009 y desde este año no se ha podido mantener la producción como se hacía en los años anteriores, a excepción de China que sigue creciendo a pasos agigantados. En tanto que el Consejo de Cooperación del Golfo (CCG) comprendido por seis países de la península arábiga con salida al Golfo Árabe/Pérsico, es decir Arabia Saudita, Bahrein, Emiratos Árabes Unidos, Kuwait, Omán y Qatar<sup>29</sup> comenzaron a producir en el año 2009 y sigue aumentando su producción.

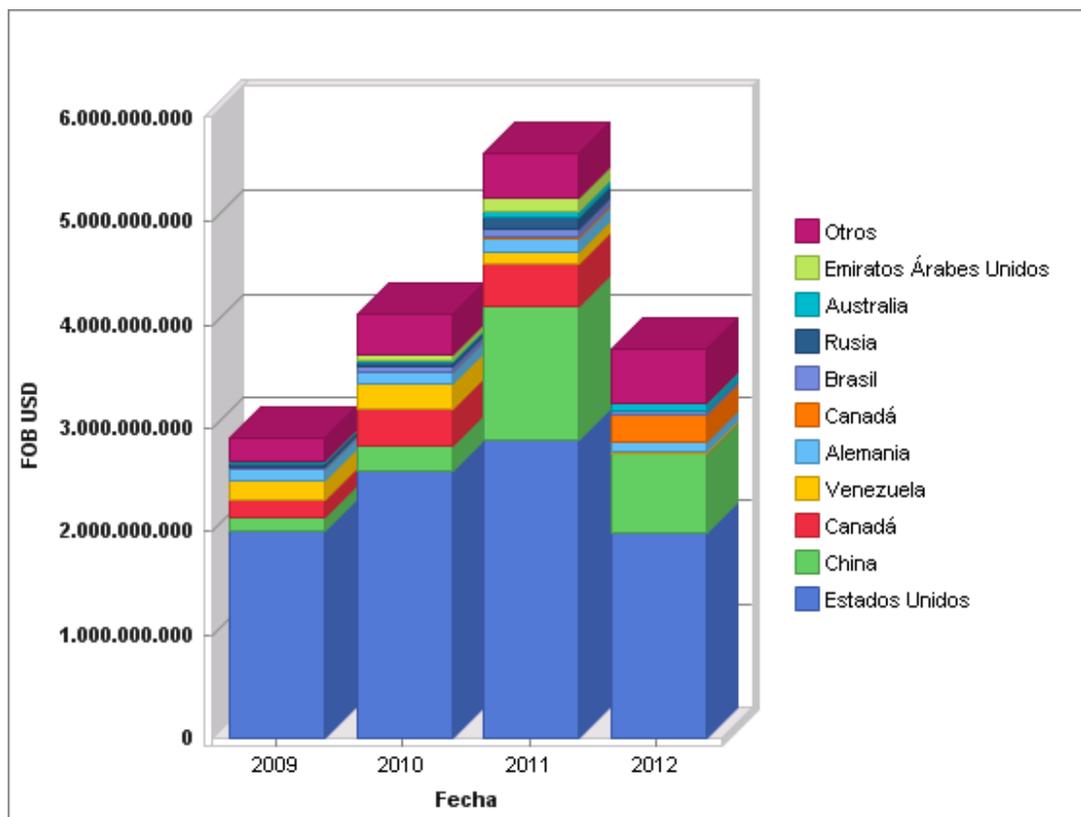
De los principales países productores de aluminio en el mundo se destacan los siguientes (véase Gráfica 1.7)



Gráfica 1.7. Principales países productores de aluminio a nivel mundial<sup>27b</sup>.

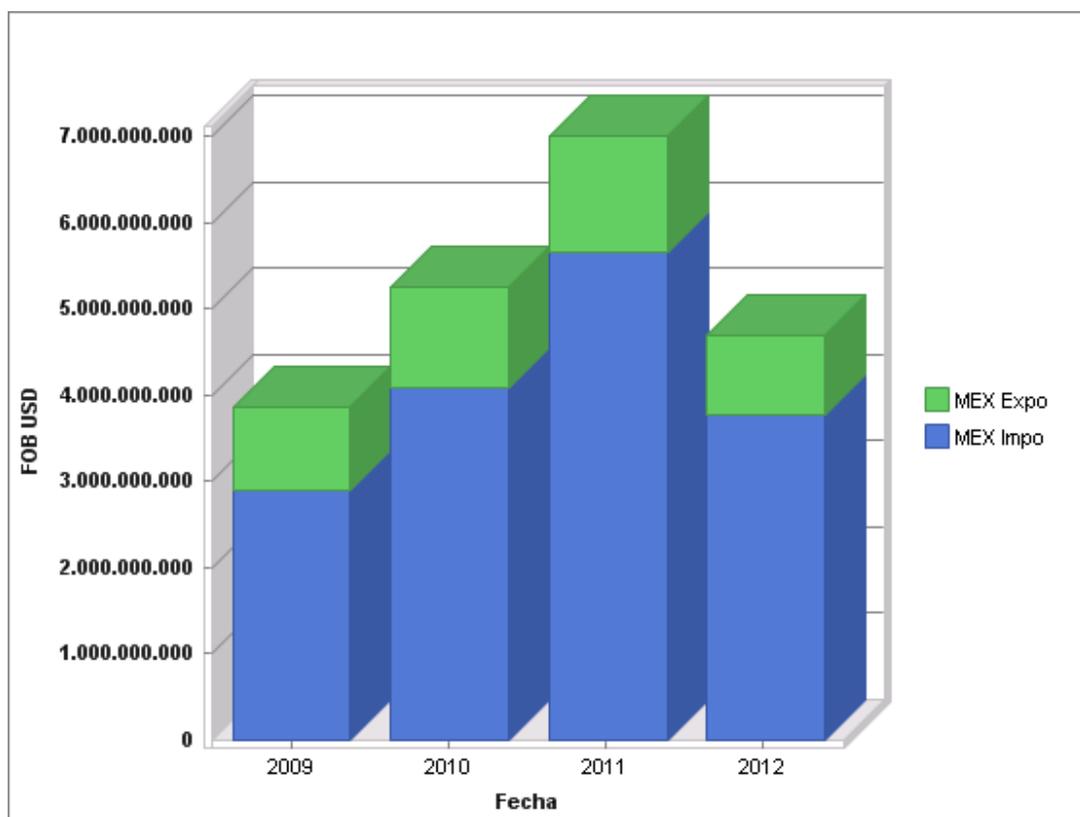
Países como Brasil, India y Sudamérica están aumentando su producción, países que en años anteriores produjeron muy poco, ahora lo están haciendo de gran manera, Canadá y Estados Unidos se han mantenido a lo largo de estos 4 años presentados.

La producción de aluminio en México no existe debido a la carencia de reservas de bauxita<sup>30</sup>, por lo tanto se tiene que importar<sup>31</sup>. Para darnos una idea de las cantidades de importaciones que tiene México se presentan las Gráficas 1.8 y 1.9



Gráfica 1.8. Importaciones del aluminio en México de 2009-2012<sup>32</sup>.

La gran mayoría de Importaciones de Aluminio están en los países de Estados Unidos y China, le siguen Canadá y Venezuela pero es de gran importancia el aporte que tiene Estados Unidos con México y es normal siendo el país vecino. Como se muestra en la Gráfica 1.8 del 2009 al 2011 aumentaron las importaciones; sin embargo en el 2012 se vieron disminuidas.



Gráfica 1.9. Importaciones/exportaciones de aluminio de México del 2009-2012<sup>32</sup>.

La exportación de aluminio en México, es menor a comparación a la importación que tiene y los principales países que exporta México son a Estados Unidos y China<sup>32</sup>.

#### 1.1.3.4 Reciclaje del aluminio.

El reciclaje del aluminio es un proceso mediante el cual, los desechos de aluminio pueden ser convertidos en otros productos tras su utilidad primaria. Este proceso implica simplemente refundir el metal, lo cual es mucho más barato y consume mucha menos energía que la producción de aluminio a partir de la electrólisis de la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Reciclar aluminio desechado requiere solamente el 5% de la energía que se consumiría para producir aluminio de la mina<sup>33</sup>. Por

este motivo, aproximadamente el 31% de todo el aluminio producido en los Estados Unidos viene de chatarra reciclada<sup>34</sup>.

Fue una práctica común desde principios del siglo XX, y se usó con mucha frecuencia durante la Segunda Guerra Mundial, por lo que el reciclaje del aluminio no es una nueva tendencia. De todas formas, hasta finales de los años 1960, fue una práctica minoritaria. Fue cuando la popularidad del aluminio creció exponencialmente debido al uso de las latas de refresco, lo que propició la conciencia del reciclaje del aluminio<sup>35</sup>.

Las fuentes de las que se toma el aluminio para su posterior reciclaje incluyen aeronaves, automóviles, bicicletas, botes, ordenadores, material de menaje, canalones, frisos, cables, y otros muchos productos que requieren un material ligero pero fuerte, o un material con alta conductividad térmica. Ya que el reciclaje no daña la estructura del metal, el aluminio puede ser reciclado indefinidamente y ser usado para producir cualquier producto que hubiera necesitado aluminio nuevo<sup>36</sup>.

## 1.2. Capas del EFT<sup>37</sup>

Gracias a las seis capas o barreras de protección de los EFT, los alimentos se mantienen en óptimas condiciones durante un largo periodo de tiempo sin la necesidad de conservadores químicos ni refrigeración.

Del Exterior al interior del envase las capas o barreras de protección son las siguientes:

1er Capa: Polietileno que impermeabiliza el envase y protege los alimentos de la humedad atmosférica externa.

2da Capa: Cartón que le da forma, estabilidad y rigidez al envase y en donde se realiza la impresión del diseño.

3er Capa: Polietileno que permite la adhesión entre el cartón y la capa de aluminio.

4ta Capa: Aluminio que actúa como barrera contra la luz y el oxígeno, es la capa más importante del envase. Gracias a este material, los alimentos permanecen completamente protegidos del medio ambiente, se garantiza la protección de sus vitaminas y nutrientes, evitando la formación de bacterias. El espesor de esta capa es la mitad del grueso de un cabello humano.

Quinta Capa: Polietileno que optimiza la adhesión del aluminio.

Sexta Capa: Polietileno que previene el contacto del producto con las otras capas del material de envase.

De esta forma ningún agente externo consigue atravesar el envase y contaminar los elementos. Además el sellado del envase se realiza por aplicación de presión y alta frecuencia, sin utilizar pegamento alguno.

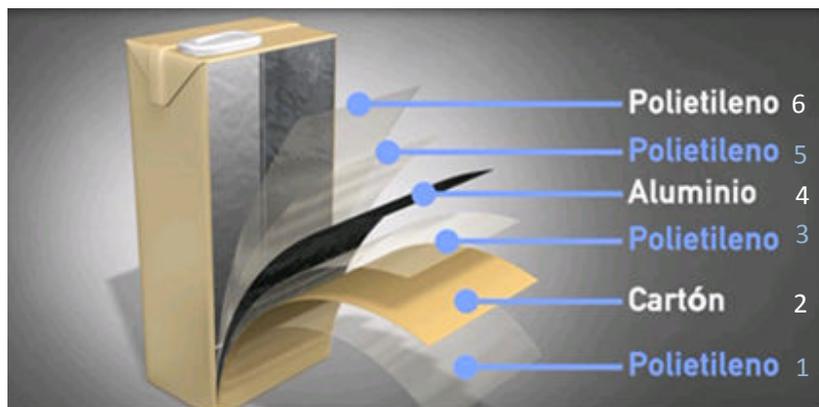


Figura 1.9. Capas del EFT<sup>38</sup>

### 1.2.1 Manufactura del EFT

La manufactura del material de envase se divide en tres procesos fundamentales, que siguen un orden obligatorio: Impresión, Laminación y Corte<sup>39</sup>.

#### 1.2.1.1 Impresión

En el proceso de impresión, se obtiene un diseño específico a partir de la combinación de colores mediante flexografía. Las materias primas que se utilizan

en este proceso son papel proveniente de Estados Unidos<sup>37a</sup>. El papel tiene como características principales, el ancho y el gramaje; y para las tintas, el tono. Estas características varían en función al envase a fabricar.

Se comienza por la impresión del papel, en donde se coloca el diseño de la imagen con la marca de cada producto en una máquina de impresión de 7 módulos, en cada módulo puede llevar una imagen o algún color que se le quiera añadir al diseño, esta máquina de impresión tiene una velocidad de 600 metros por minuto y una capacidad de 84.000 envases cada 8 minutos. Cada impresora cuenta con un equipo de secado para asegurar la adhesión de la tinta al papel. Los secadores funcionan con quemadores de gas natural para calentar el flujo de aire que se alimenta al proceso finalmente sale con el diseño y color deseado en rollos.

#### **1.2.1.2. Laminación**

El segundo paso en el proceso de transformación es la laminación. En esta etapa se le agregan al papel impreso las diferentes capas de polietileno inocuo e inerte, los cuales se colocan en silos para su posterior utilización y aluminio proveniente de Alemania y China que dan sus características de envase para alimentos líquidos.

En el proceso de Laminación, cada máquina cuenta con 2 tratadores de flama integrados al proceso, estos equipos consumen gas natural para su funcionamiento. Una máquina laminadora unirá el papel con el polietileno y con el aluminio. El papel ingresa a la máquina y una llama lo prepara para que logre una mejor adición con el polietileno, por otro lado el polietileno ingresa por una tolva en forma sólida y entra a un horno que lo calienta a unas 360 °C, así cae en forma de películas sobre el papel y la adhesión se realiza por presión y choque térmico, después ingresa la película de aluminio. Al finalizar dos nuevas películas de polietileno se adhieren, la velocidad de la laminadora son 600 metros por minuto.

### 1.2.1.3 Corte

Para la etapa de corte, los insumos que se utilizan son papel laminado y bobinas de cartón para enrollar las tiras individuales resultantes de este proceso. Una vez que se recibe el papel laminado, se monta en la cortadora y se secciona en tiras longitudinales del ancho del tamaño de envase. Una vez que el material ha sido cortado, se colocan los rollos cortados en el carro transportador para trasladarlos hasta el sistema automatizado de transporte y embalaje de rollos.



Figura 1.10. Planta productora de EFT

### 1.2.2. Producción de envases EFT.

En México se cuenta con una planta productora de EFT, la cual tiene una capacidad instalada de 8,000 mil millones de envases al año<sup>40</sup>.

En el 2010 los EFT vendidos globalmente fueron de 158,001 millones de unidades; para el 2011 ya se vendían 167,002 millones de unidades en todo el mundo; sin embargo, en México la venta de estos envases fue para el 2010 de 6,000 millones de unidades, mientras que para el 2012 ya se vendían 6,413 millones de unidades. Esto nos quiere decir que seguimos consumiendo envases asépticos y se espera que para el 2017 ya se consuman 8,000 millones de envases al año y ser de esta manera el 5to productor de envases a nivel mundial solo detrás de China, Brasil entre otros<sup>40</sup>.

### 1.2.3 Reciclaje de EFT

En el año 2010 de los 6,000 millones de unidades que se vendieron en nuestro país solo se recicló el 15% de éstos.

La empresa productora de envases EFT contribuye a desarrollar programas de reciclaje de envases usados, trabajando con sus clientes, con las autoridades municipales, con las universidades, con la comunidad y con la industria papelera. La idea es apoyar a las ciudades interesadas en desarrollar Programas de Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos, que incluyan separación en la fuente de generación, recolección selectiva y valorización de sub-productos. Dichos programas introducen criterios de eficiencia ambiental, económica y social en los sistemas de limpia pública de los municipios, reduciendo el volumen de residuos que va a relleno sanitario y permitiendo captar mayores volúmenes de sub-productos para su reciclaje. Los proyectos son desarrollados a través de Compromiso Empresarial para el Manejo Integral de los Residuos, A. C. (SUSTENTA) organización privada sin fines de lucro integrada por BIMBO, COCA-COLA, PEPSI, SABRITAS y Tetra Pak. Como primera etapa se suscribe un Convenio de Colaboración entre el Municipio, una Universidad con presencia en la región, y SUSTENTA, para la realización del Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos. Con ese Diagnóstico se diseña el modelo específico para ese Municipio y se establecen las primeras rutas piloto de recolección selectiva, para posteriormente ampliar la cobertura gradualmente. Las empresas de SUSTENTA apoyan al Municipio durante la etapa de educación y capacitación ambiental al público en general. Entre los Programas más avanzados y de mayor cobertura se encuentra el denominado "Separemos la Basura" del Municipio de Querétaro, Qro. Actualmente están en proceso de implementación programas municipales de manejo integral de residuos con las ciudades de Aguascalientes, Ags., Torreón, Coah., Cancún, Q. Roo., y Corregidora, Qro.<sup>41</sup>.

Una vez que se usó un envase, se puede transformar en objetos que pueden servir en la vida diaria, en México se recicla, y ¿Como es este proceso<sup>42</sup>? Los residuos de envases asépticos llegan a una planta recicladora de envases,

todo comienza en unas bandas transportadoras que llegan a un hydropulper, una máquina que separa el aluminio y el polímero del cartón. Primero se llena la máquina de agua y de envases de cartón. El material se procesa en lotes, durante unos 30 minutos, tiempo durante el cual la acción de rotación y agua separa la fibra del polietileno y el aluminio<sup>43</sup>. En la actualidad ya muchas empresas mexicanas utilizan las fibras de celulosa para crear nuevos productos que utilizan a diario en nuestra vida como papel de escritura, de baño, para impresión y otros.

Pero que sucede con el resto de los materiales de polietileno y de aluminio (poli-aluminio). Con este material se fabrican pequeñas capsulas con la ayuda de una máquina que lo calienta y lo extruye, que cuando se enfrían forman un duro aglomerado con una superficie brillante 100% reciclado y muy resistente que sirve para fabricar láminas para techos, muebles y casa.

Otro proceso que tiene como fundamento la pirólisis del polímero separa el polímero del aluminio en ausencia de oxígeno a una temperatura de 400 °C. El plástico se gasifica y se separa del aluminio para originar energía, y el aluminio se recupera con gran pureza<sup>44</sup>.

### 1.3 Aceite vegetal re-usado

El aceite comestible puede seguir siendo útil después de haber sido utilizado en la cocina. Gracias al interés y esfuerzo de empresas existen técnicas para reciclar el aceite vegetal utilizado<sup>45</sup> pero: ¿Qué es el aceite vegetal usado y de donde se obtiene?

El Aceite Vegetal Usado es un residuo resultado del proceso de freír alimentos. Los principales lugares donde se genera el aceite vegetal usado es en:

- Casas
- Restaurantes
- Hoteles
- Comedores Industriales
- Hospitales (comedores)

En estos lugares el aceite usado es considerado como un contaminante y es usualmente desechado por el drenaje o en otros casos reutilizados para la preparación de alimentos, lo cual es dañino para la salud pues el aceite pierde calidad y su estructura natural, generando compuestos tóxicos como dioxinas. Estas grasas se convierten en *trans* las cuales elevan el colesterol “malo” del ser humano.

Las consecuencias negativas que tiene el vertir el aceite y las grasas vegetales y/o animales por el desagüe son<sup>46</sup>:

Importante agresión al medio ambiente.

Una vez en los ríos o en el mar, el aceite vegetal usado altera la correlación del oxígeno y agua, ya que crea una película difícil de eliminar que impide el paso de la luz y el intercambio de oxígeno entre el aire y el agua, lo que altera los ecosistemas acuáticos poniendo en peligro múltiples especies animales y plantas.

Aumento de la dificultad y costo del tratamiento de aguas residuales en las plantas tratadoras.

Como es conocido, antes de regresar a ríos y mares, toda el agua que circula por el drenaje de las ciudades, pasa por una planta tratadora de aguas residuales que separa todos los sólidos e impurezas que ésta lleva. El problema de vaciar el aceite y grasas vegetales y/o animales por el fregadero, está en que estos resultan muy difíciles de separar del agua, a diferencia de las partículas sólidas que pueden eliminarse mediante un simple filtro o las demás impurezas que son eliminadas mediante microorganismos suprimidos por medio de tratamientos con ozono, ácido clorhídrico o rayos ultravioletas.

Actualmente no existe un proceso eficaz para separar estos materiales del agua. Además, el aceite y grasas vegetales y/o animales usados pueden llegar a causar diversas problemáticas en las plantas de tratamiento, como averías, obstrucciones costosas, reducción de la vida útil de la planta, lo que ocasiona un incremento del costo energético y económico del procesamiento del agua.

- Limitación en la reutilización de aguas residuales.
- Un litro de aceite contamina 1,000 litros de agua, además de multiplicar por 10 el costo del tratamiento.
- Alto costo de mantenimiento para los sistemas de alcantarillado.
- El aceite y grasas vertidos por el fregadero se solidifica causando la obstrucción y corrosión de las cañerías provocando también malos olores. Además es causante de aumento de plagas urbanas.

Las buenas prácticas en la industria alimenticia han generado una nueva industria y negocios rentables dedicados a la recolección y reciclado de aceite vegetal para generar biodiesel. Las empresas dedicadas a la recolección tienen el propósito no solo de recolectar el aceite, sino también de difundir la cultura del reciclaje así como el uso de energías renovables entre los principales generadores de aceite usado.

Actualmente existen empresas en varios países dedicadas a la recolección del aceite vegetal usado, tal como la empresa Biofuels de México que inició operaciones en 2005 en la capital de México, se ha expandido a través de todo el país y ahora se encuentra en más de 18 ciudades dando servicio de recolección a hoteles como el Hilton y a cadenas de restaurantes.

También está el caso de la empresa Proper Oils, en Reino Unido, la cual recolecta aceite vegetal y animal usado para posteriormente transformarlo; esta empresa ha sido reconocida y premiada por organizaciones y ahora es uno de los principales recolectores de aceite del gobierno en Londres.

Esta es una industria rentable que aún tiene mucho potencial y que tiene mucho por crecer, expandirse y explotar sus beneficios, especialmente por la tendencia a nivel mundial de productos en beneficio del medio ambiente.

Por lo tanto, la solución a esta grave problemática es: Reciclar el aceite y grasas vegetales y/o animales. Esto traería los siguientes beneficios:

- Eliminación de un residuo altamente contaminante del agua.

- Abaratamiento del costo y facilitación del trabajo de las plantas tratadoras de aguas residuales.
- Reutilización del agua tratada.
- Reducción en la degradación y obstrucción de los sistemas de alcantarillado.
- Disminución de la probabilidad de proliferación de microorganismos dañinos para la salud y los malos olores.

Todo esto hace que el reciclaje de estos materiales sea un tema importante. El aceite vegetal usado, recolectado y recuperado puede ser reciclado y reutilizado para la elaboración de diferentes materiales y productos como: lubricantes, jabones, velas, productos cosméticos, pinturas o barnices, biodiesel, abono orgánico y como un aditivo para alimento animal. Es por todo esto que el reciclaje del aceite vegetal usado contribuye en gran medida a la conservación del medio ambiente.

### 1.3.1 Características de aceites vegetales<sup>47</sup>.

La composición química de los aceites vegetales corresponde en la mayoría de los casos a una mezcla de 95% de triglicéridos y 5% de ácidos grasos libres, de esteroides, ceras y otros componentes minoritarios. Clasificación:

Los aceites vegetales pueden dividirse en cuatro grupos en base a su índice de yodo (IY); es el número de miliequivalentes o partes de yodo absorbido por 100 partes de peso de sustancia. Este valor da una idea del número de insaturaciones de los ácidos grasos en el aceite. Por ejemplo, un aceite totalmente saturado poseerá un IY = 0<sup>48</sup>:

- Los aceites saturados: índices de yodo de 5-50

Lóricos: copra, palmito, babasú (etc.)

Palmíticos: palma

Esteáricos: karité

- Los aceites monoinsaturados: índices de yodo de 50-100  
Oleicos: aceituna, cacahuete, colza, sésamo, jatropha curcas.
- Los aceites biinsaturados: índices de yodo de 100-150  
Linoleico: girasol, algodón, maíz, soja, etc.
- Los aceites triinsaturados: índices de yodo > 150

Desde el punto de vista “calidad” del carburante, mientras más saturado es el aceite, mejor es. Sin embargo, estos aceites saturados son sólidos a temperaturas en un intervalo de 17°C a 84°C<sup>49</sup> dependiendo del ácido graso presente en el aceite.

Características físicas y características combustibles:

Entre las semillas de plantas cultivadas por su aceite, las más conocidas son: el cacahuete, la colza, el ricino, la soya y el girasol. En cuanto a los frutos oleaginosos, estos provienen principalmente del cocotero (copra), del nogal, de la palma de aceite (palma y palmito) y del olivo (aceitunas)<sup>47</sup>.

La siguiente tabla nos muestra las características de 8 aceites vegetales.

**Tabla 10. Características físicas de diferentes aceites vegetales**

Aceite	Densidad a 20°C	Viscosidad a 20°C	“Temperatura de congelación” (°C)	“Punto de nube” (°C)	“Punto de combustión” (°C)	Poder calorífico (MJ/kg)
<b>Copra</b>	0.915	30	23/26	28	230	37.1
<b>Palma</b>	0.945	60	23/40	31	280	36.9
<b>Algodón</b>	0.921	73	-2	-1	243	36.8
<b>Tempate</b>	0.920	77	-3	2	236	38.8
<b>Cacahuete</b>	0.914	85	-1	9	258	39.3
<b>Colza</b>	0.920	78	-2	-11	285	37.4
<b>Soya</b>	0.920	61	-4	-4	330	37.3
<b>Girasol</b>	0.925	58	-6	-5	316	37.8

En la Tabla 10 se muestra claramente los altos puntos de combustión que alcanzan cada uno de los aceites mencionados; es por ello que es de gran importancia en este trabajo, ya que una de las posibilidades que se tiene es manejar temperaturas del aceite alrededor de 160°C, que es una de las propiedades que más nos interesa en este trabajo.

#### **1.3.1.1 Ventajas de utilizar aceite vegetal en comparación con el aceite sintético o derivado del petróleo.**

- Gran valor calorífico, es decir, gran densidad energética.
- Forma líquida y, por ello, fácil de usar.
- Cuando se quema emite menos hollín.
- Cuando se quema tiene una eficiencia energética más grande
- No es inflamable ni explosivo y no emite gases tóxicos.
- Es fácil de almacenar, transportar y utilizar.
- En su manejo no se requiere tomar precauciones especiales.
- Es producido de forma directa por la naturaleza, no ha de ser transformado.
- Es una forma reciclable de energía.
- No contiene sulfuro, por lo que no genera lluvia ácida cuando es usado.

#### **1.3.1.2 Desventajas de utilizar aceite vegetal en comparación con un aceite sintético o derivado del petróleo**

- Tiene un mayor costo de producción frente a la energía que proviene de los combustibles fósiles.
- Es tóxico y dañino para , animales, suelos o agua.
- Causa daños si accidentalmente se vierte.
- Producción estacional.

### 1.3.2 Variación de las propiedades del aceite con base en el reusó y a la temperatura

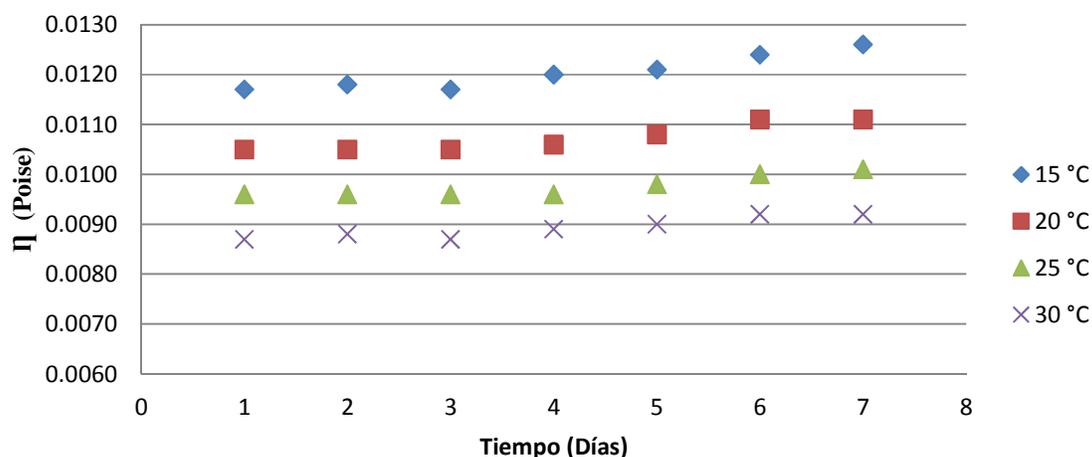
En base al aceite reusado proveniente de establecimientos donde se fríen papas y con base en un estudio obtenido<sup>50</sup>, se observó que la temperatura del aceite que se utiliza para freír los alimentos es de 150 °C a 180 °C cuando el tiempo de freído es de 2 a 3 horas por día.

**Tabla 11. Características fisicoquímicas del aceite usado<sup>50</sup>.**

Tiempo (Días)	Humedad (%)	Densidad (g/cc)	Acidez (mg KOH)	I.S* (mg KOH)
1	0.052	0.861	41.851	72.915
2	0.056	0.957	41.829	58.341
3	0.049	0.995	41.415	49.27
4	0.056	1.085	41.562	39.367
5	0.061	1.086	44.834	39.836
6	0.076	1.092	46.483	36.001
7	0.08	1.152	57.15	31.673

\*I.S; índice de saponificación

En la Tabla 11 Se observa que la humedad del aceite aumentó con el tiempo hasta un 35 % desde el primer día hasta el séptimo día. El aumento de la humedad del aceite se debe a la transferencia de agua desde el alimento al aceite en el proceso de fritura<sup>50</sup>.

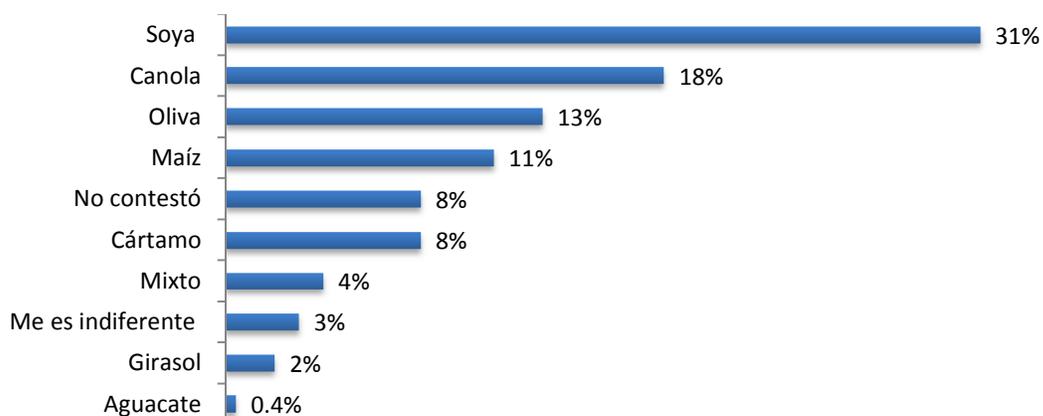


Gráfica 1.10. Variación de la viscosidad respecto a la temperatura y al tiempo de reusó del aceite.

En el Gráfica 10 establece que la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura y tiene una tendencia a aumentar con respecto al tiempo de reuso.

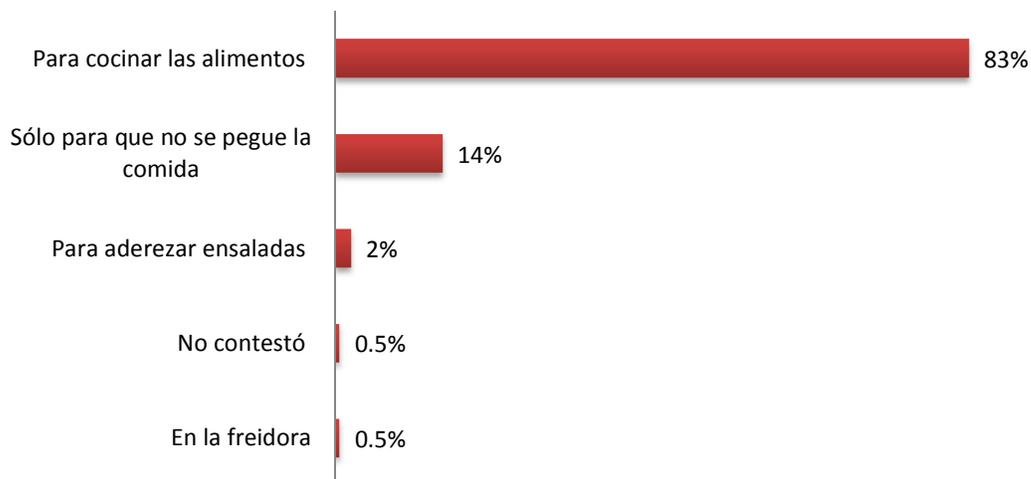
### 1.3.3 Estadísticas del consumo de aceite en México<sup>51</sup>.

En el año 2010 La Procuraduría Federal del Consumidor (Profeco) realizó un estudio en línea sobre el consumo de aceite en México, comprendido en el periodo del 11 al 28 de mayo del 2010, en donde se obtuvieron 265 respuestas de 31 estados y los resultados fueron los siguientes.



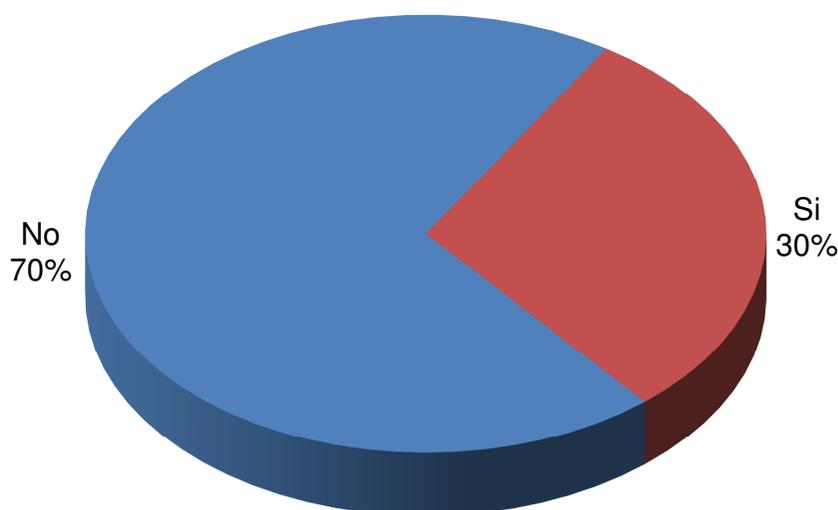
Gráfica 1.11. ¿Qué tipo de aceite para cocinar compras regularmente para el consumo en tu casa?

El aceite de soya es el más comprado regularmente por la sociedad mexicana con un 31% y en segundo lugar se encuentra el aceite de canola y los que no se compran regularmente son los aceites de girasol y de aguacate (véase Gráfica 1.11).



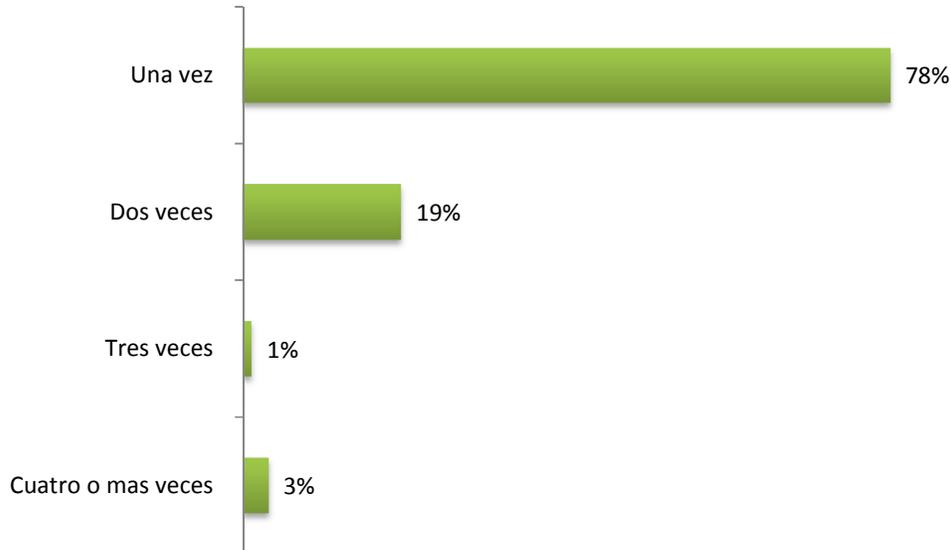
Gráfica 1.12. ¿Para qué utilizas el aceite en tu casa?

En la Gráfica 1.12 se nota que el 83% de los aceites que se consumen son para cocinar los alimentos y las demás personas lo utilizan para que no se pegue en la comida y para aderezar las ensaladas y tan solo el 0.5% lo utiliza en la freidora.



Gráfica 1.13. ¿Reutilizas el aceite que se utilizó para freír algún alimento?

En la Gráfica 1.13 se muestra que el 70% de las personas no reutiliza el aceite, solo lo utilizan por primera vez; lo cual lleva a una pregunta ¿Dónde se está almacenando todo el aceite que ya se utilizó?, este es un gran oportunidad para recolectar el aceite que no se está utilizando.



Gráfica 1.14. ¿Cuántas veces reutilizas el aceite?

Como se muestra en el Gráfica 1.14, de cada 100 personas que reutilizan el aceite el 78 lo usan una vez más, y el restante más de una vez y tan sólo el 3% lo reutiliza más de cuatro veces.

## Capítulo II. Metodología.

En este capítulo se detallan los procedimientos empleados para el proceso de separación del EFT, el cual consiste en 8 etapas principales.

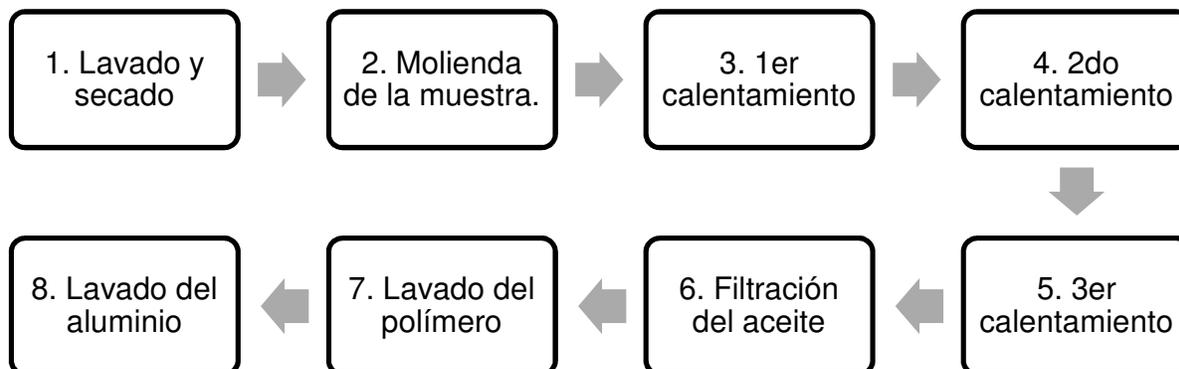


Figura 2.1 Proceso de separación de EFT.

En el Diagrama 2.1 se muestran las diferentes etapas del proceso, las cuales se describirán en los puntos siguientes, se puede visualizar de mejor manera cada una de las etapas que corresponden al proceso de separación del aluminio y el polímero, se pueden observar los materiales de entrada a cada una de las etapas además de los productos salientes y finalmente se visualiza como se transformaron los productos en cada uno de las fases del proceso.

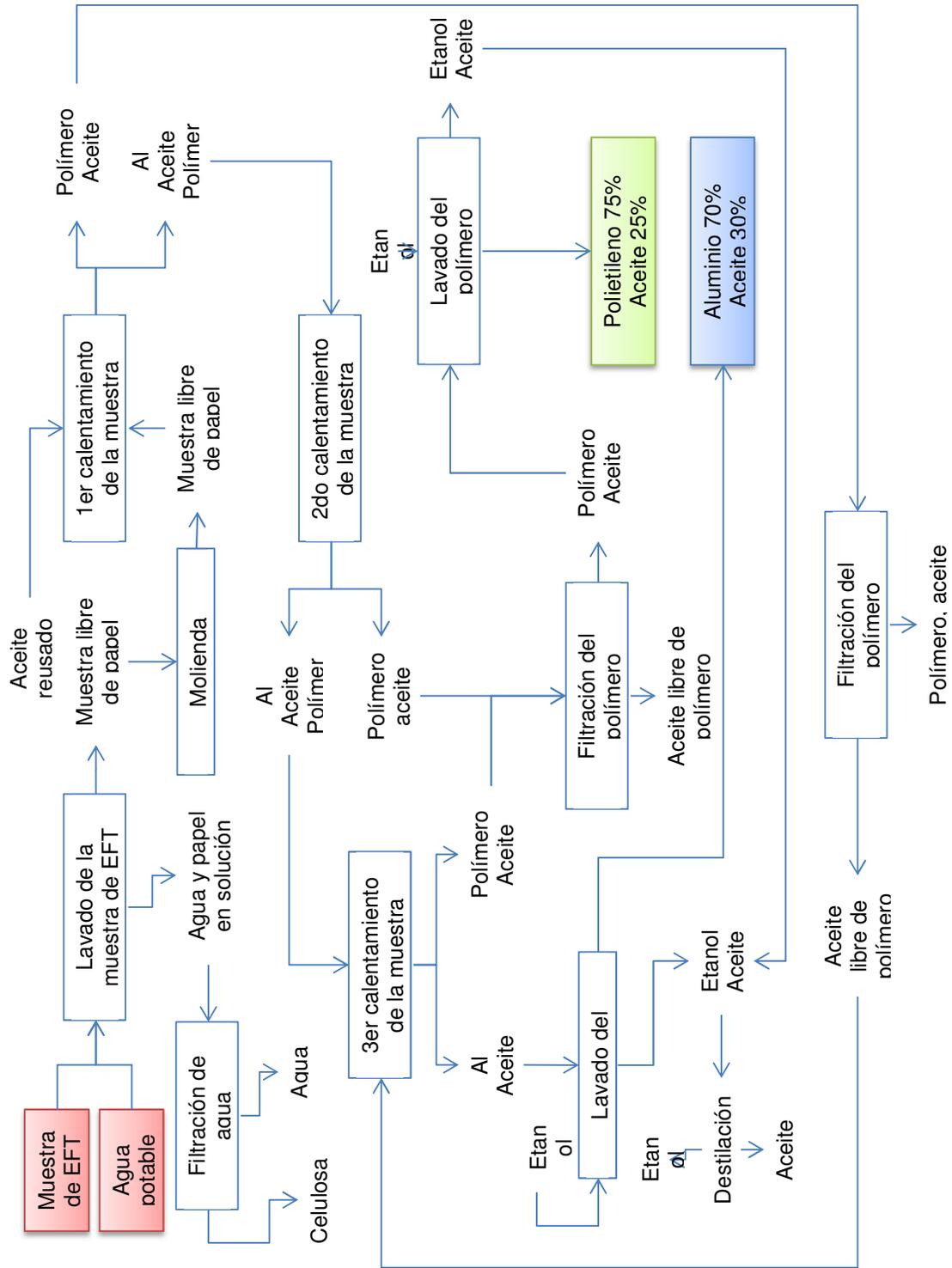


Diagrama 2.1 Proceso de separación de aluminio y polímero de EFT

Los objetivos que se establecen en esta metodología son los siguientes.

- Desarrollar un proceso de separación aluminio-polímero de los envases flexibles tetra pak donde se utilicen aceite reusable y etanol, en base a la afinidad del polímero.
- Hacer que el proceso sea sustentable con el menor uso de energía y reactivos.

## 2.1 Materiales

- Aceites reusados.
- Muestra de envases flexibles de tipo Tetra Pak (EFT)
- Alcohol etílico (pureza de 99.8%, FERMONT)
- Agua potable

## 2.2 Equipo empleado

- Parrilla de calentamiento
- Vasos de precipitado de 250 ml
- Equipo de aislamiento
- Termómetro
- Refrigerante recto
- Mangueras de látex
- Bomba de recirculación
- Matraz de Bola de 500 ml
- Matraz Kitasato de 500 ml
- Embudo de filtración Buchner de porcelana
- Molino

Enseguida se describirán cada una de las etapas a las cuales se sometió la muestra de EFT. Pero antes se describe la muestra que se utilizó en la experimentación.

### 2.3 Muestra de EFT.

La muestra de EFT con la cual se trabajó, consta de las últimas 4 capas que conforman al EFT como se muestra en la Figura 2.2

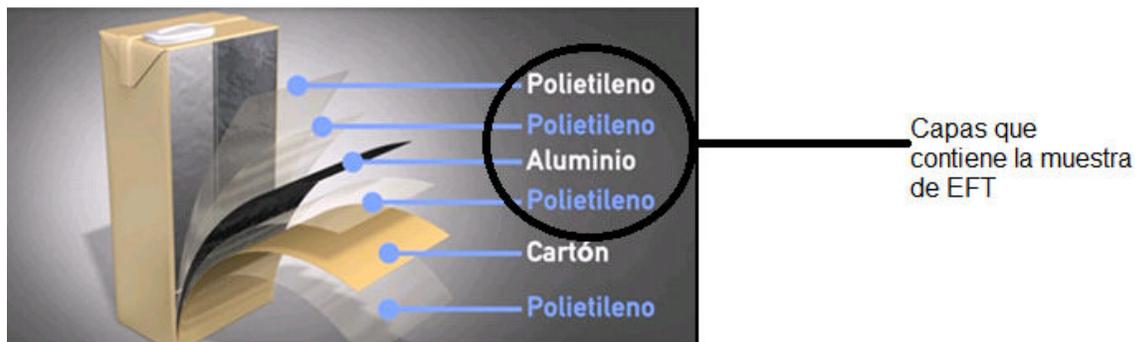


Figura 2.2 Capas de aluminio que se utilizan en la muestra.

Esto se debe a un tratamiento previo de una empresa tratadora de envases que solo extrae las dos primeras capas, el cartón y el polietileno.

### 2.4 Porcentaje de Aluminio en la muestra

Para determinar la composición de aluminio contenida en la muestra de EFT mediante un proceso de pirólisis, consiste en colocar la muestra en una mufla a  $400^{\circ}\text{C}^{44}$  para eliminar todo el polímero, restos de cartón y otras impurezas eso se comprobó por la diferencia de pesos antes de meter la muestra a la mufla y después de que se realizó la pirólisis. Después la muestra se lava con agua para eliminar los restos de carbón presentes en el aluminio.



Figura 2.3 Restos de aluminio después de la pirólisis.

## 2.5 Lavado y secado de la muestra de EFT.

El lavado se realiza porque la muestra de EFT contiene cartón de procesos anteriores que no fueron removidos por completo, el lavado se realiza en un vaso de precipitados de 2L donde la muestra que contiene segmentos, en promedio con una medida de 8 cm por 5 cm, se agrega con 750mL de agua potable y se deja reposar durante 48 h sin agitación. Poco a poco se va separando la celulosa de la muestra de tal forma que queda suspendida en el agua en la parte superior del vaso, de esta manera se puede limpiar la muestra y queda libre de celulosa, posteriormente se seca durante 2h en una estufa a 80 °C porque después de esa temperatura se tienen cambios en la morfología de las láminas de polímero, es algo que no se quiere en el presente trabajo, debido a que el polímero será reutilizado para la misma función en etapas posteriores. La celulosa se filtra para separarla del agua y así poder reutilizar el agua para procesos posteriores.



Figura 2.4 Recipiente con muestra de EFT

## 2.6 Molienda de la muestra de EFT.

En este paso se tritura la muestra seca libre de celulosa en un molino para reducir el tamaño de las partículas y favorecer el área de contacto con el aceite reusado y sea más fácil la separación del aluminio y el polímero.



Figura 2.5 a) Molino usado para triturar la muestra, b) Muestra con un tamaño de partícula pequeño.

### 2.7 1er calentamiento de la muestra de EFT

Se calienta en una parrilla de calentamiento, 100 g de Aceite reusado a una temperatura de 140 °C, ya alcanzada la temperatura se adiciona 10gr de muestra previamente molida poco a poco y se cubre con un equipo de aislamiento conformado por una capa de tela aislante y una de papel aluminio, como se muestra en la Figura 2.6, con el fin de mantener la temperatura constante durante 1 h; se estableció este tiempo en base a una serie de experimentaciones donde se encontró que el tiempo óptimo para llevar a cabo la separación en esta etapa fue de 1h .



Figura 2.6 Parrilla de calentamiento con el equipo de aislamiento alrededor del vaso de precipitado.

Al finalizar la hora de calentamiento a 140 °C, se vacía el aceite con el polímero a un vaso de precipitados de 250ml; el aluminio con el polímero y el aceite remanente se mantienen en el vaso de 2L, se deja reposar el aceite y el polímero, al enfriarse lentamente se aprecia la formación de sólidos por parte del polímero, como se muestra en la Figura 2.7.

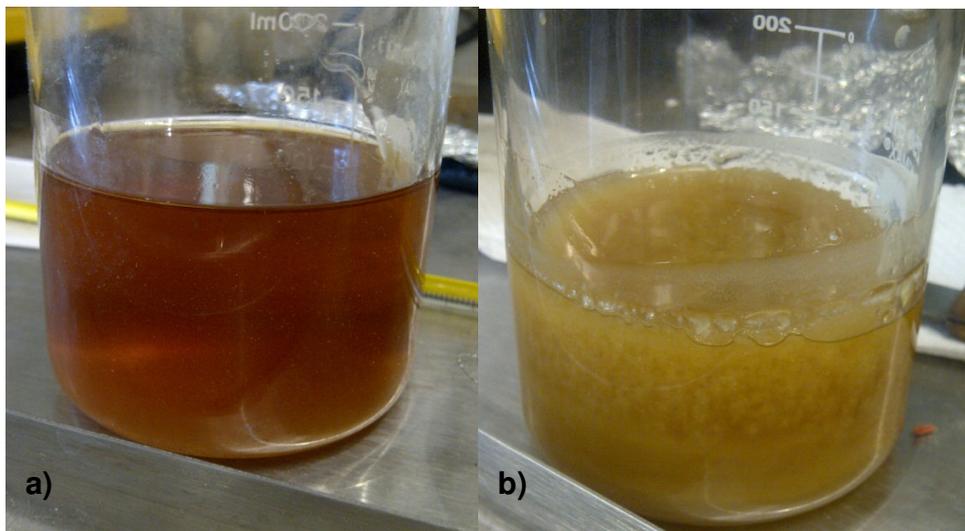


Figura 2.7 a) Aceite y polímero inmediatamente después de que se vació al vaso posterior a una hora de calentamiento. b) Muestra como el polímero se solidifica después del enfriamiento.

En la Figura 2.8, la muestra aún contiene restos de aceite; sin embargo, se ve aglomerada debido a que todavía hay presencia del polímero, es por eso que se continúa con un segundo tratamiento con aceite.



Figura 2.8 Muestra de aluminio, aceite y polietileno remanente después de una hora de calentamiento.

### **2.8 2do calentamiento de la muestra de EFT.**

Posteriormente, al paso descrito en el punto 2.7, la muestra se vuelve a calentar con 100g de aceite fresco a las mismas condiciones, ya que el aceite usado en el primer calentamiento queda saturado del polímero suspendido. Se vuelve a separar la muestra de aluminio como en la etapa anterior y se deja enfriar el aceite con el polímero para su segunda recolección.

### **2.9 3er calentamiento de la muestra de EFT.**

Posteriormente se calienta la muestra con las mismas condiciones del primer calentamiento, ya que aún contenía restos de polímero.

Al finalizar este paso se separa la muestra de aluminio, observando que las partículas del metal se encuentran libres de polímero, confirmándolo por la formación de partículas más pequeñas y sin presencia de aglomeración, la cual se presentaba en los pasos 2.8 y 2.7, prácticamente solo contenía aluminio y aceite reusado.

Cabe señalar que la cantidad de polímero fue reduciéndose notablemente al finalizar cada uno de los calentamientos, comparando las muestras en cada uno de los pasos anteriormente descritos.

En cuanto al aceite con restos de polímero, se deja enfriar igual que en las etapas posteriores para que se solidifique y se recolecte, esta cantidad es muy pequeña en comparación con las anteriores, con lo que se demuestra la extracción del polímero paso por paso en cada uno de los calentamientos (ver Figura 2.9).



Figura 2.9 Muestra después de tres calentamientos.

### 2.10 Filtración del aceite con el polímero

La solución de la Figura 2.6b se filtró a vacío durante 24 h, 48 h y 72 h, para ver la cantidad de aceite reusado removido de polímero, el aceite recuperado de esta etapa se reutilizó en el 3er calentamiento y el polímero recuperado se pasa al paso de lavado (ver Figura 2.10).



Figura 2.10 Filtración de polímero

### 2.11 Lavado del polímero.

Una vez filtrado el polietileno se lava con etanol a 85 °C durante 1h en una parrilla de calentamiento a reflujo en un matraz de bola, un refrigerante, una bomba de recirculación y mangueras además del equipo de aislamiento, como se muestra en la Figura 2.11, para eliminar la cantidad de aceite remanente. Posterior al lavado de polímero, el etanol se destila para recuperarlo y además se recupera el aceite removido del lavado.



Figuran 2.11 Lavado del Polímero

### 2.12 Lavado del aluminio.

El mismo procedimiento que se realizó para lavar el polímero, se realizó para el aluminio a diferencia de que se lavó dos veces con etanol, se utilizó 50 ml de etanol en cada lavado, para poder eliminar la mayor cantidad del aceite en la muestra de aluminio. Se colocó la muestra de aluminio y aceite reusado en un matraz de bola con un refrigerante a reflujo de etanol durante 1h. (Ver Figura 2.11).

### Capítulo III. Resultados y discusión

En este capítulo se analizaron los resultados obtenidos en base a la metodología descrita en el Capítulo anterior.

#### 3.1 Porcentaje de aluminio en la muestra.

En la siguiente tabla se muestra las pruebas que se realizaron para determinar el porcentaje de aluminio en la muestra y los resultados que se obtuvieron fueron:

Tabla 12. Porcentaje de aluminio y tiempo de calcinación		
Prueba	Porcentaje de aluminio	Tiempo que se mantuvo en la mufla
1	22 %	1h
2	18 %	3 h
3	20 %	2 h
4	21 %	1.5 h

Promedio = 20.25 %

Desviación estándar = 1.7 %

Lo cual nos indica que la cantidad de aluminio en la muestra de EFT tiene un porcentaje en masa de 20.25 %  $\pm$  1.7 % de aluminio,

Si consideramos una muestra de 100 g de EFT tenemos:

75% de papel<sup>52</sup> = 75 g de papel

20% polietileno = 20 g de polímero

5% de aluminio = 5 g de aluminio

Si la muestra de EFT con la que se trabaja proviene de un proceso donde se elimina el papel, nuestra muestra estará conformada por:

20 g de polímero

5 g de aluminio

Total = 25 g de muestra

Por lo tanto el porcentaje de aluminio teórico presente en nuestra muestra es:

$$\frac{5 \text{ g de aluminio}}{25 \text{ g de muestra}} = 20 \% \text{ de aluminio}$$

En las pruebas 1 y 4 se obtuvo más de 20% esto se debe a que aún contenían residuos de carbono que no se pudieron eliminar en el proceso de pirolisis.

El resultado teórico de la muestra y el resultado que dio a nivel laboratorio puede variar, debido a que la muestra con la que se trabaja puede tener mayor o menor cantidad de aluminio, debido a que en los últimos años se pudo reducir la lámina de aluminio, disminuyendo la cantidad de aluminio, además como son residuos y no se sabe de qué años son, el porcentaje de aluminio puede variar. Este cálculo fue para darnos un parámetro de referencia. Por otro lado al limpiar el aluminio posiblemente las variaciones en los pesos de las muestras 1 y 4 fueron mayores a 20% debido a que todavía contenía restos de carbón en la superficie del posible aluminio.

### **3.2 Porcentaje de papel contenido en la muestra de EFT.**

Los resultados después de haber lavado y secado la muestra de EFT para determinar qué porcentaje de papel contenía la muestra, fueron de 10% de papel. Esto se determinó pesando la cantidad de muestra antes de lavarlo, comparando el peso después del proceso de lavado.

### 3.3 Porcentaje de aluminio en la muestra final.

El porcentaje de aluminio en la muestra final es de 70%, y el 30% restante es de aceite que no se removió en el proceso de limpieza con alcohol, este proceso se realizó en dos etapas de lavado. En el primer lavado se eliminó el 61% del aceite presente en la muestra (aluminio, aceite); en el segundo lavado se eliminó tan solo el 15% del aceite contenido en la muestra, y finalmente para determinar la cantidad final del aluminio, se colocó la muestra en la mufla y se incrementó la temperatura a 400°C durante 2 h. Este método fue muy parecido a la determinación de aluminio del EFT, debido a que no presenta restos de cenizas y que en el proceso no se percibió un olor a plástico quemado. No hay presencia de polímero en la muestra pero si de aceite.



Figura 3.1 Muestra de aluminio libre de aceite y de polímero.

El 70% de aluminio presente en el producto final es un gran avance en el desarrollo de este proceso, ya que no se contaba con ningún antecedente del mismo proceso y similares que resultaran en cantidades menores al 40%, resultados no viables económicamente. Por lo que es de gran importancia el porcentaje alcanzado en este trabajo, ya que a la hora de reutilizar el aluminio se tendrá que elevar la temperatura por encima de su punto de fusión (660°C) lo cual nos ayudara a eliminar el 30% de aceite contenido en la muestra final.

Dado que en México no se produce aluminio y solo se importa, el proceso presentado en este trabajo es de gran relevancia, ya se podría obtener aluminio,

dado que el proceso de producción de aluminio en la actualidad es muy caro; por lo que este proyecto cobra aún más importancia ya que sin duda podría ser menor costoso.

### **3.4 Porcentaje de separación de aluminio en la muestra de EFT.**

En base al porcentaje de aluminio determinado en el punto 3.3, se determina el porcentaje de separación del aluminio en la muestra de EFT, el cual nos indica que fue de 100%.

### **3.5 Porcentaje de polietileno en la muestra final.**

El porcentaje de polietileno en la muestra final es de 75%, y el 25% restante es de aceite que no se removió en el proceso de limpieza con alcohol. Se determinó la presencia de polietileno de baja densidad colocando la muestra en la mufla a 120 °C, para determinar si realmente se fundía a esa temperatura la cual resultó favorable y con ellos se comprueba la presencia del polietileno sin embargo se recomienda utilizar pruebas de análisis termogravimétrico (TGA) y de infrarrojo para comprobar de forma fehaciente estos resultado, el porcentaje de polietileno se determinó en base al punto 3.3.



3.2 Muestra de polímero

### **3.6 Porcentaje de separación de polietileno en la muestra de EFT.**

En base al porcentaje de polietileno determinado en el punto 3.5 y al porcentaje de aluminio determinado en el punto 3.4, se determinó que la separación del polietileno fue del 100%.

### 3.7 Balance de masa del proceso de separación del aluminio y polímero a partir de EFT.

En la Tabla 13 se muestra, el número de pasos en el proceso, la descripción del paso y las entradas de los materiales y la salida de los productos.

**Tabla 13. Balance de masa del proceso de separación del aluminio y el polímero a partir de EFT**

Paso	Descripción del paso	Entrada	Salida
<b>Lavado de la muestra de EFT</b>			
1	Cargar agua potable al vaso de 2L	750g	
2	Cargar muestra de EFT al vaso de 2L	10g	
	Total	<b>760g</b>	
3	Muestra libre de Papel		9g
4	Agua + papel contenida en la muestra de EFT		751g
	Total		<b>760g</b>
<b>Molienda de la muestra de EFT libre de papel</b>			
5	Carga de muestra de EFT libre de papel al molino	<b>10g</b>	
6	peso de la muestra de EFT con tamaño de partícula pequeño		<b>10 g</b>
<b>1° calentamiento de la muestra de EFT libre de papel y con tamaño de partícula pequeño</b>			
7	Carga de aceite reusado fresco a vaso de 250 ml	<b>100g</b>	
8	Carga de la muestra de EFT libre de papel y con tamaño de partícula pequeño a vaso de 250 ml	<b>10g</b>	
	Total	<b>110g</b>	
9	Polímero y Aceite		19.268g
10	Aluminio, polímero y aceite		17.268g
11	Aceite filtrado del paso 9		73.464g
	Total		<b>110g</b>
<b>2° calentamiento de la muestra Aluminio, polímero y aceite de la 1er etapa de calentamiento</b>			
12	Carga de aceite reusado fresco a vaso de 250 ml	<b>100g</b>	

13	Carga de la muestra Aluminio, polímero y aceite de la 1er etapa de calentamiento	17.268g	
	Total	<b>117.268g</b>	
14	Polímero y aceite		2.74g
15	Aluminio, polímero y aceite		14.519g
16	Aceite filtrado del paso 14		100.009g
	Total		<b>117.268g</b>
<b>3° calentamiento de la muestra Aluminio, polímero y aceite de la 1er etapa de calentamiento</b>			
17	Carga de aceite reusado del paso 11 a un vaso de 250 ml	73.464g	
18	Carga de la muestra Aluminio, polímero y aceite de la 2da etapa de calentamiento	14.519g	
	Total	<b>87.983g</b>	
19	Polímero y aceite		1.05g
20	Aluminio y aceite		6.5g
21	Aceite filtrado del paso 19		80.433g
	Total		<b>87.983g</b>
<b>Filtración del aceite</b>			
22	Filtración de aceite en el paso 16	100.009g	
23	Filtración de aceite en el paso 21	80.433g	
	Total	<b>180.442g</b>	
<b>Lavado del aluminio</b>			
24	Cargar etanol a un matraz de bola de 250 ml	100g	
25	Cargar el aluminio y aceite del paso 20	6.5g	
	Total	<b>106.5g</b>	
26	Etanol con aceite		103.276g
27	Aluminio más aceite		3.224g
	Total		<b>106.5g</b>
<b>Lavado del aluminio</b>			
28	Carga del polímero y aceite del paso 9	19.268g	
29	Carga del polímero y aceite del paso 14	2.74g	
30	Carga del polímero y aceite del paso 19	1.05g	
31	Cargar etanol a un matraz de bola de 250 ml	100g	
	Total	<b>123.058g</b>	
32	Polímero y aceite		10.416g
33	Etanol más aceite		112.642g
	Total		<b>123.058g</b>
<b>Destilación del Etanol</b>			

34	Cargar Etanol más aceite del paso 26	103.276g	
35	Cargar Etanol más aceite del paso 33	112.642g	
	Total	<b>215.918g</b>	
36	Etanol		200g
37	Aceite recuperado de la destilación		15.918g
	Total		<b>215.918g</b>

**Tabla 13. Balance de masa del proceso de separación del aluminio y el polímero a partir de EFT continuación...**

Porcentaje de composición del aluminio y polímero	Peso de las muestras finales	Aceite	Polímero	Aluminio
Polímero y aceite	10.416g	2.616g	7.8g	0.0g
Aluminio y aceite	3.224g	1.024g	0.0g	2.2g
Total partiendo de la muestra de EFT			<b>10g</b>	
Aceite de la filtración		180.442g		
Aceite recuperado de la filtración		15.918g		
Total de aceite recuperado del proceso		<b>200g</b>		

### 3.8 Porcentaje de recuperación y composición de los productos de salida pertenecientes al polímero en cada una de las etapas del proceso.

En este la Figura 3.3 se identifica como están ordenados los datos que se mostraran en las Figuras 3.4 y 3.5 en esta sección

Etapa	
Entrada	Salida
% de separación	
% de composición de salida	

Figura 3.3 Ordenamiento de los datos en las diferentes etapas.

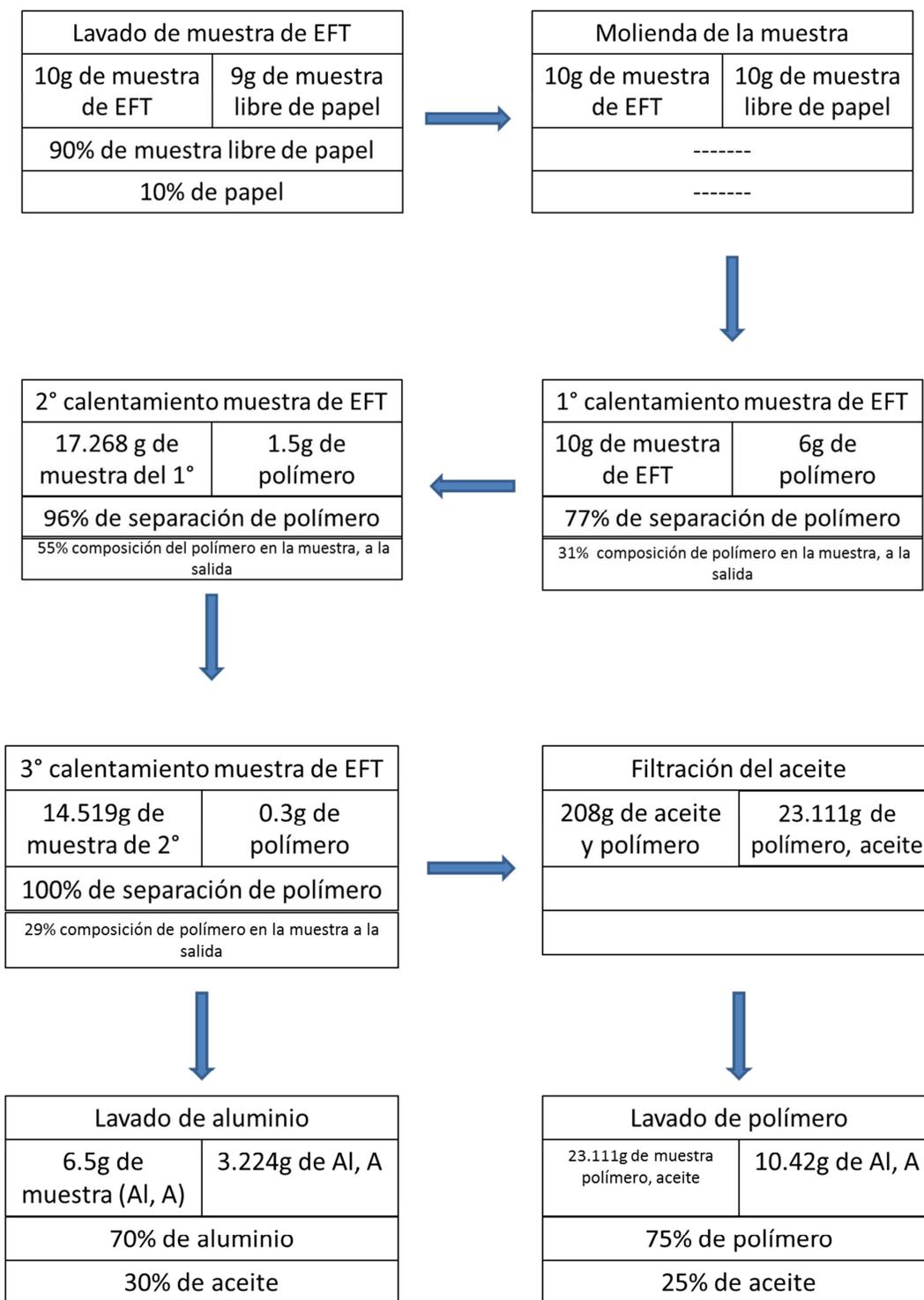
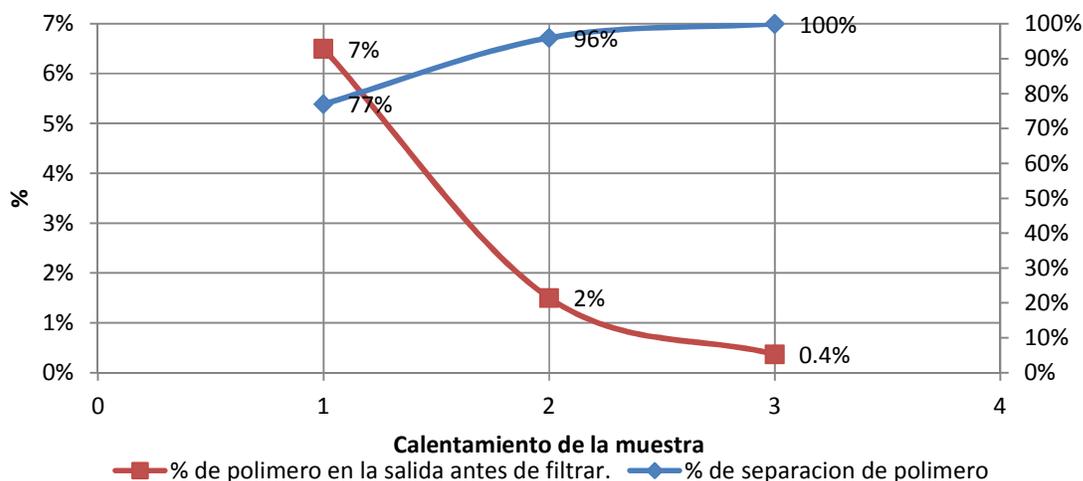


Figura 3.4 Porcentaje de recuperación y composición del polímero en los productos de salida en cada una de las etapas del proceso.

Como se muestra en la Figura 3.4, en el lavado de la muestra se eliminó el 10% correspondiente a la cantidad de papel, posteriormente en la etapa de molienda no se pierde producto. En el 1° calentamiento se recupera la mayor cantidad de polímero presente en la muestra, debido a que la muestra inicial de EFT contiene 7.8g de polímero y en el primer calentamiento se extrajeron 6g de polímero correspondiente a 77% de separación de polietileno, y en la salida como se muestra en la Tabla 13, el producto pesa 19.268g después de filtrar el aceite; esto significa que los 6g de polímero representan el 31% de polímero en el producto de salida.

En el 2° calentamiento se recuperaron 1.5g de polímero, que sumado al peso del polímero en la etapa anterior dan un 96% de separación de polímero de la muestra inicial de EFT; mientras que la composición de la muestra a la salida es de 55% de polímero después de filtrar el aceite, en el 3° calentamiento se recuperó el polímero restante para dar un total en la separación del 100%, y un 29% de composición en la salida después de filtrarse debido a que solamente la muestra presentaba 0.3g de polímero. Por lo tanto la solución en la salida es menos concentrada que en las anteriores. En la filtración se muestra como se separa el aceite del polímero. Y finalmente después del proceso de lavado del polímero tenemos una composición de 75% de polímero y 25% de aceite.



Gráfica 3.1 Porcentaje de polímero en la salida antes de filtrar y porcentaje de separación del polímero

En la Gráfica 3.1 se demuestra que en cada calentamiento se disminuye la composición en masa del polímero en la salida antes de filtrar el aceite y al mismo tiempo aumenta la separación del mismo.

El aceite de cocina se puede utilizar para ayudar al desarrollo de nuevos procesos y no solamente para contaminar el ambiente al desecharlo de una manera inadecuada. Además de que el aceite lo podemos utilizar como fuente de generación de energía.

En este proceso para la extracción del aceite sólo se utiliza como reactivo el etanol, que posteriormente se recupera mediante una destilación, además el agua potable que se utiliza también se recupera por filtración para separar la celulosa del agua, por lo que respecta al aceite se recupera mediante filtración. Por lo tanto, este proceso no desecha ningún material ni contamina al medio ambiente porque todos los materiales y disolventes de partida se recuperan para su uso posterior en otros procesos.

### **3.9 Porcentaje de recuperación y composición de los productos de salida pertenecientes al aluminio en cada una de las etapas del proceso.**

Como en el punto anterior se mencionó la composición de los productos de salida en cada una de las etapas del proceso del polímero, en esta sección se mencionarán las composiciones del aluminio en las salidas de cada sección del proceso, ver Figura 3.5.

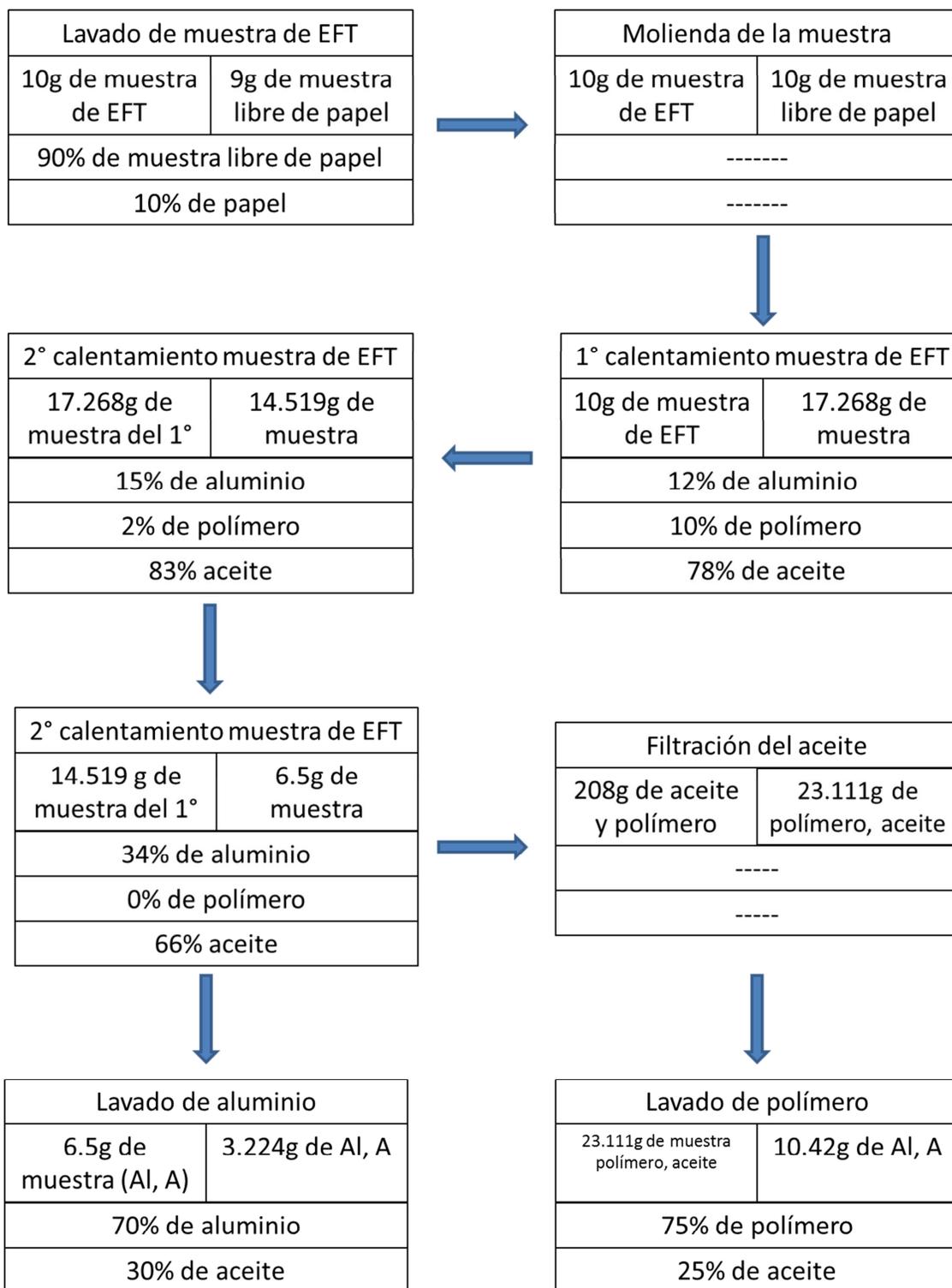


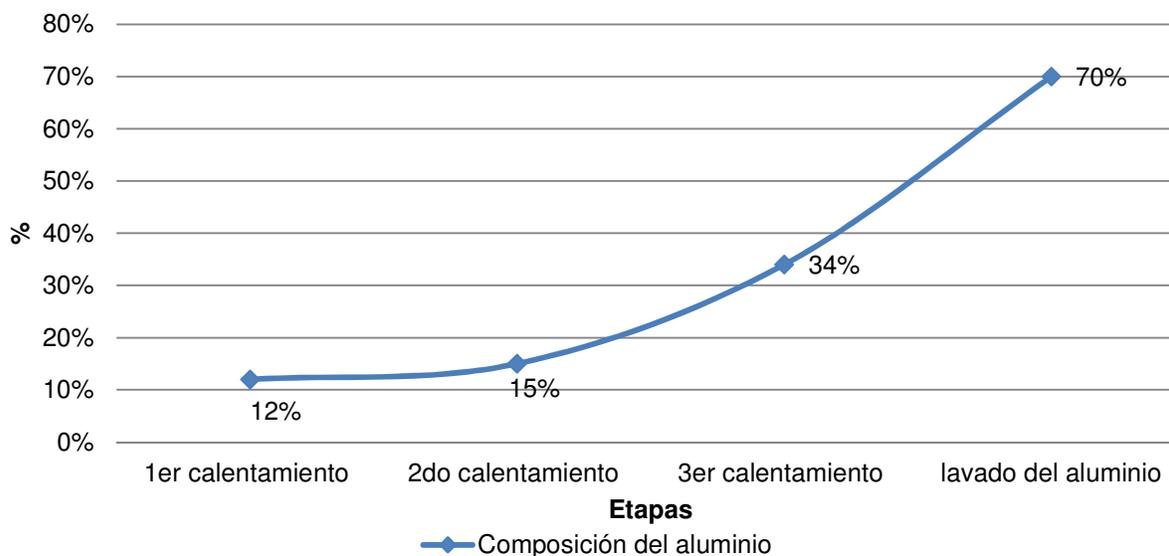
Figura 3.5 Porcentaje de recuperación y composición del aluminio en los productos de salida en cada una de las etapas del proceso.

Como se muestra en la Figura 3.5, durante el lavado de la muestra se eliminó el 10% correspondiente a la cantidad de papel, posteriormente en la etapa de molienda no se pierde producto, en el 1er calentamiento a la salida de la etapa hay una composición de aluminio de 12% esto se determinó sabiendo que la muestra de EFT inicial contiene el 22% de aluminio lo cual representa en una muestra de 10g de EFT, solo 2.2g.

En el 2° calentamiento la composición de aluminio a la salida de esta etapa es de 15%, esto se debe a la disminución del polímero presente en la muestra de EFT inicial, dando como resultado el incremento en la composición del aluminio sin embargo, aumentó la composición del aceite en la muestra de salida. En el 3° calentamiento la muestra saliente de esta etapa contiene 34% de aluminio sin la presencia de polímero, pero con gran cantidad de aceite con un 66%. En esta etapa el aluminio está completamente separado del polímero. Finalmente, después del proceso de lavado del aluminio hay una composición del aluminio de 70% por 30% de aceite. Sin embargo conforme se aumentan los lavados con etanol para la eliminación de aceite en la muestra (aluminio-aceite) disminuye 15% de aceite, poco en comparación al primer lavado que fue del 50%; lo que nos hace pensar que no es viable realizar más de dos lavados porque la cantidad de aceite que se remueve es mínima, y se gastaría en energía y en etanol utilizado en este proceso.

Dentro del proceso de separación del aluminio y del polímero a partir de EFT, se concluye que a medida que se aumentan los calentamientos, aumenta la cantidad de aluminio recuperado de la muestra al final de cada etapa, como se puede ver en la gráfica siguiente.

El aceite se recupera mediante las filtraciones que se realizan a lo largo del proceso y se utiliza para procesos posteriores.



Gráfica 3.2 Porcentaje de aluminio en la salida de cada etapa

Se demostró que es posible separar el aluminio de una forma pura sin necesidad de utilizar disolventes caros y que no son amigables con el medio ambiente, puesto que sólo se utiliza un aceite reciclado que no implica un gasto mayor, además resulta menos tóxico que los disolventes comunes, esto permite reducir el costo de recuperación de aluminio y obtener un producto que puede ser utilizado a nivel industrial y para la producción de películas o cualquier otra aplicación. El otro producto secundario resultante es el polietileno de baja densidad, que también es separado. Sin embargo, no se ha logrado obtener en forma totalmente pura debido a que todavía contiene aceite, por lo que la separación del aceite y el polímero se dejará para trabajos futuros puesto que el objetivo de este trabajo solo era encontrar el procedimiento adecuado para la separación del polietileno y del aluminio. Sin embargo, se logró obtener el aluminio que a simple vista parecería no tener contaminantes, lo cual se tendrá que comprobar analizándolo con TGA e infrarrojo, pero el caso del polímero es diferente puesto que se requieren realizar diversas experimentaciones para la extracción del aceite e implica por lo menos 3 meses más de trabajo.

## Capítulo IV Conclusiones.

En este capítulo se establecen las conclusiones con base en los resultados reportados en el capítulo III.

En este trabajo se comprobó que se puede separar el aluminio y el polímero con aceites reusados de establecimientos de comida frita.

El porcentaje de aluminio en la muestra final es de 70%, y el 30% restante es de aceite.

El porcentaje de polietileno en la muestra final es de 75%, y el 25% restante es de aceite.

Finalmente, este trabajo establece las bases del proceso de separación del aluminio y polietileno, un proceso que ayudará a la reducción de desechos de envases EFT, favoreciendo tanto a la comunidad como al país.

## Recomendaciones

- Realizar trabajo de investigación en la limpieza del polímero, además de realizar pruebas de caracterización para determinar la pureza y calidad del polímero.
- Elaborar un estudio de reproducibilidad del método.
- Efectuar pruebas para determinar la calidad y pureza del aluminio obtenido de este proceso.
- Desarrollar un plan de negocios en base a este proyecto para determinar la viabilidad del proceso y determinar el costo que resulta el aluminio con este proceso.
- Establecer las condiciones de un posible escalamiento.
- Para la recolección de aceite se recomendaría realizar un convenio con el municipio de Toluca, en conjunto con la Universidad Autónoma del Estado de México UAEMéx para crear programas de recolección de aceite en los hogares y en los establecimientos de comida frita de nuestro municipio.
- Para la recolección de EFT, la empresa Tetra Pak ® tiene convenios con diferentes ciudades del país y en coordinación con el municipio de Toluca y la UAEMéx ayudarían a la captación de estos envases que en la actualidad en Toluca no existe.

**Bibliografía**

1. News, F. Tetra Pak Iberia vendió 7.796 millones de envases en 2011. <http://www.feedpacknews.com/empresas/emblematica/2012/06/3492> (accessed 1 de Marzo de 2013).
2. Rodríguez, I. Tetra Pak: materia prima para industria. <http://www.cnnexpansion.com/manufactura/2011/07/27/tetra-pak-materia-prim-para-industria> (accessed 4 de Marzo 2013).
3. Thesis Consultores, S. C., Análisis de los Mercados de Diversos Materiales Vírgenes y Reciclados para la Producción de Envases. Ambiental, D. G. d. I. e. P. y. E., Ed. Mexico, 2002.
4. González Martínez, A. C., Costos y beneficios ambientales del reciclaje en México. Una aproximación monetaria. *Gaceta ecológica* **2001**, (58), 17-26.
5. Thesis Consultores, S. C., Precios de los Materiales Recuperados a través de la Pepena. Ambiental, D. G. d. I. e. P. y. E., Ed. 2002.
6. SEMARNAT, Directorio de Centros de Acopio de Materiales Provenientes de Residuos en México 2010. SEMARNAT, Ed. Mexico, 2010.
7. ZIKLUM ZIKLUM materia en evolucion. <http://ziklum.com/quienes.html>.
8. PAPEL, E., INTRODUCCIÓN A SOPORTES CELULÓSICOS.
9. Anonimo El papel ¿que es el papel? . [https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:nPnXeW4rbd8J:educacion.ucv.cl/prontus\\_formacion/site/artic/20061215/asocfile/ASOCFILE120061215122644.pdf+que+es+el+papel&hl=es&gl=mx&pid=bl&srcid=ADGEESh3ZZZBLigsi2G1NzGBG9w4xhdLNx0r1bAbgHcl\\_kXx\\_3PQyI\\_WPKNmBxSfOLT4\\_afaLZ-Nf4TCYQKhbqhc9-3y2028bfKmv4JMF EjZG3d6Dh05Y0iLUPh4JxZ75Z2lpvc70N22&sig=AHIEtbRi2VEQ2wVjAfWbyIraNBWOqWBn2A](https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:nPnXeW4rbd8J:educacion.ucv.cl/prontus_formacion/site/artic/20061215/asocfile/ASOCFILE120061215122644.pdf+que+es+el+papel&hl=es&gl=mx&pid=bl&srcid=ADGEESh3ZZZBLigsi2G1NzGBG9w4xhdLNx0r1bAbgHcl_kXx_3PQyI_WPKNmBxSfOLT4_afaLZ-Nf4TCYQKhbqhc9-3y2028bfKmv4JMF EjZG3d6Dh05Y0iLUPh4JxZ75Z2lpvc70N22&sig=AHIEtbRi2VEQ2wVjAfWbyIraNBWOqWBn2A).
10. Anonimo Polietileno de baja densidad <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/06/polietileno-de-baja-densidad.html> (accessed 6 de Marzo de 2013).
11. Yurkanis Bruice, P., Química orgánica. In *5a. ed.* [Online] 2008.

12. McMurry, J., *Química orgánica*. Cengage Learning Editores: 2008.
13. Ramírez, B. M. Uso eficiente de energía, desarrollo sustentable y conservación de recursos naturales no renovables. el caso de las bolsas de polietileno versus la utilización de otros materiales. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2010.
14. Hopp, V., *Fundamentos de tecnología química*. Reverte Editorial Sa: 1984.
15. Ortuño, Á. V., *Introducción a la química industrial*. Reverté: 1999.
16. Austin, G. T.; Rubio, M. E. E.; Herzberger, J. S.; Muriel, R. V., *Manual de procesos químicos en la industria*. McGraw-Hill: 1988; Vol. 1.
17. Mayer, L., *Métodos de la industria química: en esquemas de flujo en colores. Parte 2a, Orgánica*. Reverté: 1987; Vol. 2.
18. Evers, B.; Hawkins, S.; Schulz, G., *ULLMANN'S enciclopedia of Industrial Chemistry*. VCH: 1990.
19. Billmeyer, F. W., *Ciencia de los polimeros*. Editorial Reverté, S.A.: 1975.
20. Ortiz, M. P. C. *Presente Futuro de la Industria del Plástico en México*; Pemex: Ambiente Plástico, 2012.
21. Vázquez, D. A., *Diccionario de ciencias*. Editorial Complutense, S.A.: 2000.
22. Hufnagel, W., *Manual Del Aluminio*. Reverte, Editorial S.A.: 1992.
23. Anonimo practicas Industriales <http://www.geocities.ws/mcandrew33/Folder/resumen.htm> (accessed 6 de Marzo de 2013).
24. Rubinos González, D., *Utilización de lodos rojos de bauxita en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligroso*. Univ Santiago de Compostela.
25. McGraw Chemistry: Matter and Change. [http://glencoe.mcgraw-hill.com/sites/007874637x/student\\_view0/chapter20/section3/self\\_check\\_quizzes.html](http://glencoe.mcgraw-hill.com/sites/007874637x/student_view0/chapter20/section3/self_check_quizzes.html) (accessed 16 de Marzo de 2013).
26. Rayner-Canham, G.; García, R. L. E.; y García, H. J. E.; Garcés, S. B., *Química inorgánica descriptiva*. Addison Wesley Longman: 2000.
27. (a) Grupo de análisis de las perspectivas de desarrollo, B. M. *ALUMINIO*; Banco Mundial.: 2009; (b) Anonimo PRIMARY ALUMINIUM PRODUCTION. <http://www.world-aluminium.org/statistics/> (accessed 25 de Marzo de 2013).

28. REUTERS, Escasa producción de aluminio. *ManuFactura informacion estrategica para la industria* 2012.
29. Anonimo Oficina Comercial de Chile Emiratos Arabes Unidos. <http://www.chile-dubai.com/page.php?id=9> (accessed 26 de Marzo de 2013).
30. Shaila Rosagel, I. R., Los cinco insumos más utilizados. *CNNExpansión* 2011.
31. Rosagel, S., Crecerá el consumo de aluminio en 2012. *Manufactura* 2012.
32. Trade Comercio Exterior de México de NCE aluminio y sus manufacturas <http://trade.nosis.com/es/Comex/Importacion-Exportacion/Mexico/Aluminio-manufacturas/MX/76> (accessed 20 de Marzo de 2013).
33. Anonimo. The price of virtue 2007. [http://www.economist.com/node/9302727?story\\_id=9302727](http://www.economist.com/node/9302727?story_id=9302727) (accessed 9 de marzo de 2013).
34. Bray, E. L. *ALUMINUM*; U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: 2008; p 2.
35. Schlesinger, M. E., *Aluminum Recycling*. Taylor & Francis: 2006.
36. Anonimo, Metals - aluminium and steel recycling. In *Waste Online* 2005; Vol. 2013.
37. (a) Vilchez, H., Envases tetrapak Como se fabrican Discovery Channel Mexico 2011; (b) Pak, T. Las 6 barreras de protección del envase. <http://www.tetrapak.com/co/Pages/Las6CapasdeProducci%C3%B3n.aspx> (accessed 22 de marzo de 2013).
38. Anonimo Novedad mundial en reciclaje, en Castellbisbal. [http://www20.gencat.cat/portal/site/territori/menuitem.bd76c203a0da08645f13ae92b0c0e1a0/?vgnextoid=5c1bc3be04fbb210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnextchannel=5c1bc3be04fbb210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnextfmt=detall2&contentid=be3cc391c18c4310VgnVCM2000009b0c1e0aRCRD&newLang=es\\_ES](http://www20.gencat.cat/portal/site/territori/menuitem.bd76c203a0da08645f13ae92b0c0e1a0/?vgnextoid=5c1bc3be04fbb210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnextchannel=5c1bc3be04fbb210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnextfmt=detall2&contentid=be3cc391c18c4310VgnVCM2000009b0c1e0aRCRD&newLang=es_ES) (accessed 21 de Marzo de 2013).
39. Mexico, G. *REPORTE DE EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO*; Gei México: Queretaro, Mexico, 2010; p 14.

40. Aguilar, A., Busca Tetra Pak que México se convierta en su 5° sitio productivo, mas exportaciones quid y qui otros segmentos el camino *Universal* 2013.
41. Pak, T. Desarrollo de programas de reciclaje. [http://www.tetrapak.com/mx/environment/reciclaje\\_edu/programas\\_reciclaje/pages/default.aspx](http://www.tetrapak.com/mx/environment/reciclaje_edu/programas_reciclaje/pages/default.aspx) (accessed 24 de Marzo de 2013).
42. Gutiérrez, S. S., Reciclaje de los envases Tetra Pak en México. Tetra Pak: 2011.
43. Consuelo, TECHOS HECHOS DE TETRAPACK EN BRASIL. In *te quiero verde* Brasil, 2010; Vol. 2013.
44. Anonimo, Reciclaje de tetrapak o tetrabrick en la Ciudad de México. In *hecho verde*, Ciudad de México, 2009; Vol. 2013.
45. ADMIN Recolección y Reciclado de Aceite Vegetal Usado. <http://www.masideasdenegocio.com/ecologicos/recoleccion-y-reciclado-de-aceite-vegetal-usado/> (accessed 29 de Marzo de 2013).
46. Energeticos, S. RECICLAJE DEL ACEITE VEGETAL USADO. [http://www.gruposonne.com.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=26&Itemid=24&lang=en](http://www.gruposonne.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=26&Itemid=24&lang=en) (accessed 27 de Marzo de 2013).
47. Anonimo *El aceite vegetal*; p 5.
48. Castro, P.; Coello, J.; Castillo, L.; Action, P., *Opciones para la producción y uso de Biodiesel en el Perú*. Soluciones Prácticas, ITDG: 2007.
49. Bailey, A. E.; Padrón, A. G.; Cartaya, L. M., *Aceites y grasas industriales: obra indispensable a químicos e ingenieros interesados en la producción y fabricación de aceites y grasas*. Editorial Reverté, S.A.: 1961.
50. LIZCANO, J. M. M. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA VARIACION DE LA VISCOSIDAD DE UN ACEITE DEGRADADO POR FRITURA EN INMERSION DE PAPAS. UNIVERSIDAD DE PAMPLONA, Pamplona, 2007.
51. Profeco *Sondeo en línea sobre el consumo de aceite comestible*; Procuraduria Federal al Consumidor México, 2010; p 18.

52. Pak, T. COMPOSICIÓN DEL ENVASE.  
[http://www.tetrapak.com/cl/products\\_and\\_services/elsistemetetabrik/composici%C3%B3n%20del%20envase/Pages/default.aspx](http://www.tetrapak.com/cl/products_and_services/elsistemetetabrik/composici%C3%B3n%20del%20envase/Pages/default.aspx) (accessed 22 de marzo de 2013).