



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN ENTRE EL  
PROCESO DE EXTRUSIÓN Y EL EPS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**P R E S E N T A:**

**HÉCTOR ARTURO ORTIZ CHÁVEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. FERNANDO VELÁZQUEZ VILLEGAS  
2014  
Ciudad Universitaria, México**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



# Contenido

<b>Contenido</b> .....	1
Agradecimientos.....	4
Objetivo .....	6
Necesidad .....	6
Alcances del proyecto.....	6
1    Antecedentes.....	7
¿Qué es el unicel?.....	7
Historia .....	7
Fabricación .....	8
Inicios.....	10
El Poliestireno Expandido en la Actualidad (producción).....	12
Polimerización por suspensión.....	15
Preparación del reactor.....	15
Polimerización .....	15
Impregnación.....	15
Formación de partículas y estabilización.....	16
Preformado.....	17
Maduración .....	17
Espumado final.....	17
Propiedades Físicas y Mecánicas.....	18
Conductividad Térmica.....	18
Propiedades Mecánicas.....	19
Resumen .....	19
Usos del EPS.....	20
Producción Actual.....	20
Reciclaje del EPS .....	21
2    El reciclaje de plásticos en México .....	22
La producción de desechos en el país .....	23

Potencial de Reciclaje de los desechos .....	27
El camino de la basura .....	27
Legislación en materia de Residuos Sólidos.....	28
Leyes vigentes .....	28
Antecedentes en el manejo de residuos plásticos.....	29
La situación en México.....	31
Desarrollos previos en el manejo de EPS en el mundo.....	32
El Densificado Mecánico .....	33
El Termodensificado.....	33
Otros desarrollos.....	36
El reciclaje del EPS en nuestro país.....	37
3    Proceso de Diseño.....	38
Requerimientos y especificaciones.....	38
Ecodiseño y sustentabilidad.....	39
4    Resultados.....	41
Manufactura .....	41
5    Conclusiones .....	44
Trabajo a futuro .....	44
6    Bibliografía .....	45
7    Apéndice A: Tabla de ilustraciones .....	48
8    Apéndice B: Tablas.....	49
9    Apéndice C: Gráficas .....	50



## Agradecimientos

Después de cinco años de constante estudio, he conseguido una meta que, de alguna forma, puede ser representada por esta obra, que espero algún día me permita trascender.

Como dice Octavio Paz, “Todo es presencia, todos los siglos son éste presente”; quiero agradecer en primer lugar a mis padres, ya que sin su incondicional apoyo, no hubiera logrado nada de lo que hoy se plasma en este libro, y para mí es un orgullo poder regalarles esta tesis y el titularme como ingeniero, que seguramente significa mucho más para ellos que para mí.

Agradezco también a mis profesores que inculcaron en mí todos los conocimientos que me permitieron desarrollar este proyecto, pero en específico, quiero agradecer a mis sinodales, quienes fueron los que me obligaron a dejar la procrastinación y ayudaron a concluir mi tesis.

A mis amigos, que siempre fueron un gran soporte en esta aventura universitaria, Víctor Emmanuel, Alejandro, Jorge Luis, Enrique, Arnulfo, Gerardo, Víctor Fernando, Miguel, Cecilia, Paulina... En fin, evitaré nombrar a todos para ser coherente al cuidado medioambiental y solo usar una página de agradecimientos.

Agradezco a la Sociedad de Exalumnos de la Facultad de Ingeniería, SEFI, que gracias a su apoyo me permitió acercarme a este proyecto y lograr llevarlo a conclusión. En especial a sus expresidentes, Juan Casillas, Fernando Gutiérrez y Luis Ascencio, actual presidente; por sus consejos, confianza y tirones de orejas.

Así mismo, quiero agradecer a la IP y sus locos dirigentes que hicieron esto realidad.

Gracias a Gerardo Pedra de DART de México, por enseñarme que cuando se lleva a cabo una suma de voluntades, el cielo es el límite. Por enseñarme lo que no se enseña en las aulas de la H. Facultad de Ingeniería y por su confianza. Así mismo a Michael Westerfield de DART Container Corp. Por confiar en la ingeniería mexicana.

También, a mis amigos de la SECITI, quienes me ayudaron a redactar la patente presentada ante el IMPI, a Bego, Víctor y Fabián, gracias.

Y al final, pero no por ello menos importante, quiero dedicarle mi tesis a mi hermana Renée.

## Acknowledgments

After five long years studying, I have achieved a goal in my life that may be represented by this work. I hope someday mi thesis, could make me transcend.

As Octavio Paz said, "All is presence, all the centuries are this present", we are what we are because of our parents. I want to thank you both for the outstanding effort you make through my whole life. Because of you, I am standing where I am. I want to give you this book as a gift because I know you will appreciate it, way much as I do.

Also, I want to thank to all my professors, from whom I learned all the skills I needed to finish this project, but certainly, I want to thank, foremost, to my synods whom forced me to left the procrastination and get this thesis done.

To my friends for being my cornerstone in this journey called college. Víctor Emmanuel, Alejandro, Jorge Luis, Enrique, Arnulfo, Gerardo, Víctor Fernando, Miguel, Cecilia, Paulina... If I name them all, I wouldn't be achieving the green award by writing more than one page of acknowledgments.

I want to thank the Engineering School Alumni Society, SEFI, by its acronym in Spanish. Because of its support I could get in touch with this project and helped me to bring it to a successful end. To its former presidents, Juan Casillas, Fernando Gutiérrez, Luis Ascencio, current president, for their advice, confidence and straighten me out.

I want to thank the Private Sector that make this come true.

Thanks to Gerardo Pedra, from DART de Mexico, for teaching me that the addition of wills, will make the sky the limit. For teaching me all that isn't taught inside the classrooms of the H. Engineering School and for his confidence. To Michael Westerfield, from DART Container Corp. for trusting in the Mexican engineering.

Also to my friends of the SECITI, whom helped me to write down the application for the patent submitted to the IMPI. Thank you Bego, Víctor and Fabián.

And last, but not less important, I want to gift this thesis to my little sister, Renée.

## **Objetivo**

El objetivo de la presente tesis es diseñar una máquina que transforme poliestireno expandido post consumo y embalaje en pellets de poliestireno.

## **Necesidad**

Diseñar una máquina para obtener pellets de poliestireno a partir de material de desecho de poliestireno expandido.

## **Alcances del proyecto**

El alcance del presente proyecto será la construcción, a nivel de prototipo funcional, de una máquina capaz de transformar poliestireno expandido en su presentación post consumo o embalaje, en pellets de poliestireno.

# 1 Antecedentes

Previo a abordar el tema de este trabajo por completo, vale la pena que el lector se familiarice con la información previa necesaria para la comprensión de la misma, por lo que a continuación se describen algunos conceptos, así como la evolución de algunos procesos y/o máquinas.

## ¿Qué es el unigel?

El unigel es el término que se le da en el centro sur de la República Mexicana al Poliestireno Expandido, EPS. En otras partes a este material se le conoce como hielo seco, telgopor, isopor technopor, espuma blanca, entre otros.

El Poliestireno expandido es una variante física del Poliestireno, que a su vez es el cuarto polímero de mayor producción en el mundo, y el segundo en México después del PET<sup>1</sup>.

## Historia

El primer acercamiento por parte del hombre hacia los polímeros fue el celuloide, creado por John Wesley Hyatt; patentado en 1869<sup>2</sup>. Sin embargo, existen registros previos a Wesley Hyatt que describen un proceso de polimerización, denominado en ese entonces oxidación, ya que el término no fue acuñado hasta 1920 por Staudinger.

En 1839, Eduard Simon, un boticario de Berlín, destiló resina de ambar con una solución de carbonato de sodio, obteniendo un aceite al que él llamó estiról, hoy conocido como estireno<sup>3</sup>. Dentro de sus observaciones anotó:

*“Que con aceite viejo, el residuo que no pudo ser vaporizado sin descomponerse, es mayor que con aceite nuevo; sin duda alguna debido a una conversión continua del aceite por medio de aire, luz y calor en una sustancia parecida al caucho.”<sup>4</sup>*

Simon, creyó que la sustancia se había oxidado, por lo que la llamó óxido de estiról. Posteriormente cuando él mismo descubrió la ausencia de oxígeno, lo llamó metastiról.

Esta situación conmocionó a los químicos de la época, ya que a pesar de que no había cambio en la fórmula empírica de la sustancia, sus propiedades físicas y químicas habían cambiado completamente. Este fue el primer caso de polimerización del que se tenga registro.

---

<sup>1</sup> (ANIPAC 2012)

<sup>2</sup> (Encyclopedia Britannica 1995)

<sup>3</sup> (Ostromislensky 1927)

<sup>4</sup> (Scheirs and Priddy 2003)

Para 1845 Blyth y Hofmann observaron que el metastiról se formaba al exponer el estireno a la luz solar<sup>5</sup>.

Pero no es hasta que el químico orgánico alemán Staudinger caracterizó al Poliestireno, que se demuestra que en el experimento de Simon se había logrado la polimerización del estireno.

Staudinger observó que el Poliestireno se podía fraccionar en diferentes muestras en soluciones con diferente viscosidad; lo que contradecía la idea de que era un agregado coloidal. Postuló así, que el Poliestireno era un polímero de alto peso molecular y que las sustancias poliméricas no estaban sujetas por medio de fuerzas de asociación<sup>6</sup>. Además introdujo el término de macromoléculas para describir a las cadenas poliméricas de estireno, y para 1932 descubrió que el Poliestireno no podía presentar una forma cristalina debido a su falta de estereorregularidad; lo que lo convertía en un material amorfo<sup>7</sup>.

Los críticos argumentaron que el material no podía ser de alto peso molecular debido a su facilidad de disolución en solventes comunes; sin embargo su calidad de material amorfo le permite la solubilidad en ellos.

### Fabricación

El gran boom de la investigación y desarrollo en polímero se dio durante la Segunda Guerra Mundial, por el lado alemán, a través de BASF se llegó a implementar un proceso mediante el cual la producción en serie de Poliestireno a partir del estireno se podía realizar en serie, mientras que por el lado americano tan solo se caracterizó el proceso básico para polimerizar el estireno.

Dow Chemical fue la compañía pionera en América en la producción de Polistireno, ideando un proceso conocido como “El de los Diez Galones”, ya que consistía en llenar bidones de diez galones con estireno resultado de la mezcla de Benzeno y Etileno. Los bidones una vez sellados se calentaban lentamente en baño maría por varios días hasta llegar a una polimerización del 99% Ilustración 1-1 Fotografía del proceso de los Diez Galones. (Propiedad de Dow Chemical)

Posteriormente, el gobierno de los Estados Unidos, en vista del corte de suministro de caucho natural debido a la guerra, implementó en 1942 el “American Synthetic Rubber Research Program” al cual inyectó cerca de un billón de dólares (mil millones), rivalizando con el proyecto Manhattan en alcance y significancia, ya que fijaba la meta de tener una producción de caucho sintético a partir de Poliestireno de 30 mil toneladas distribuidas en cuatro fábricas. En tan ambicioso proyecto se unieron Dow, Monsanto y Koopers Chemical;

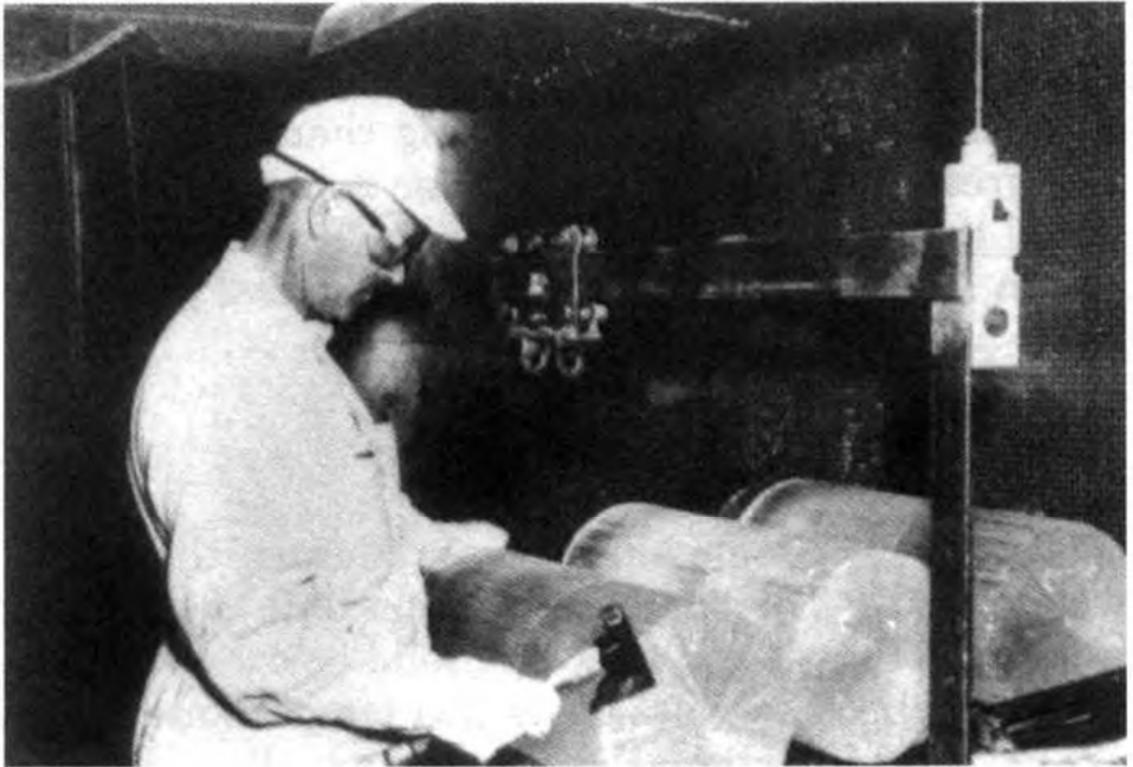
---

<sup>5</sup> (Hiatt and Bartelt 1959)

<sup>6</sup> (Scheirs and Priddy 2003)

<sup>7</sup> Ibidem

mientras que numerosos ingenieros de Goodyear, B.F. Goodrich, Standard Oil, Firestone y US Rubber también se involucraron en el proyecto<sup>8</sup>.



*Ilustración 1-1 Fotografía del proceso de los Diez Galones. (Propiedad de Dow Chemical)*

El caucho sintético producido por el proyecto era ABS, Acrilonitrilo Butadieno Estireno.

Al finalizar la guerra, los objetivos planteados por el programa no se alcanzaron, sin embargo se pudieron mejorar los procesos de producción de variantes del Poliestireno:

- Se descubrió que el llegar a tan solo el 72% de polimerización del estireno, se mejoraba el proceso de conversión a caucho del mismo.
- Se descubrió que al añadir peróxido como catalizador al monómero de estireno el tiempo de polimerización disminuía considerablemente y así se pudo duplicar la producción
- Koopers Chemical introdujo el proceso de polimerización por suspensión que posteriormente serviría para la producción de espumas de Poliestireno<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> Ibidem

<sup>9</sup> (Berger and Meyerhoff 1989)

## Inicios

El concepto de Poliestireno celular es por primera vez reportado en 1935 por los Suecos Munters y Tandberg, quienes registraron la patente con el nombre de “Foamed Polystyrene”<sup>10</sup>(Poliestireno Espumado).

El inventor del Poliestireno Expandido o Unicel, fue Ray McIntire, un joven investigador de Dow. Él argumenta haber descubierto este material por accidente cuando trataba de encontrar un aislante eléctrico flexible en la época de la segunda guerra<sup>11</sup>. Dentro de sus objetivos buscaba encontrar un nuevo material con características similares al caucho, de tal manera que no fuera tan frágil como el Poliestireno virgen; para ello, experimentó con isobutano, un líquido volátil bajo presión.

En la prueba, McIntire creó una mezcla de estireno con isobutano, sin embargo agregó un exceso del último, lo que provocó que se formaran burbujas en el polímero. El resultado fue un material 30 veces menos denso que el Poliestireno. A este material se le denominó “Styrofoam” (nombre con el cual comúnmente se le conoce al Poliestireno expandido (EPS) en el habla inglesa), al día de hoy, Styrofoam es una marca registrada de Dow Chemical.

En el año de 1942 Dow comienza su investigación para extruir EPS, utilizando un clorocarbono de bajo punto de fusión (Clorato de Metileno), como agente detonador.

Por su parte BASF desarrolló su propio proceso de producción de EPS, a través de la polimerización por suspensión y cambiando el agente detonante por pentano. Al mismo tiempo de patentar su proceso, hace de Styropor una marca registrada, la cual se vuelve el nombre con el que comúnmente se le llama a este material en Alemania. El proceso de BASF es después adoptado por los mayores productores de EPS debido a su eficiencia.<sup>12</sup>

Este material tiene un auge para la década de los 50 debido a su facilidad de expansión por medio de vapor dentro de moldes, permitiendo así la manufactura de diversos productos desechables.

Por su parte en México, la industria del Poliestireno inicia con la llegada de Monsanto a Lechería en 1951<sup>13</sup>, y la producción de EPS en 1978 cuando se establece en Tultitlan BASF<sup>14</sup>.

---

<sup>10</sup> (Brinkmann-Rengel and Niessner 2000)

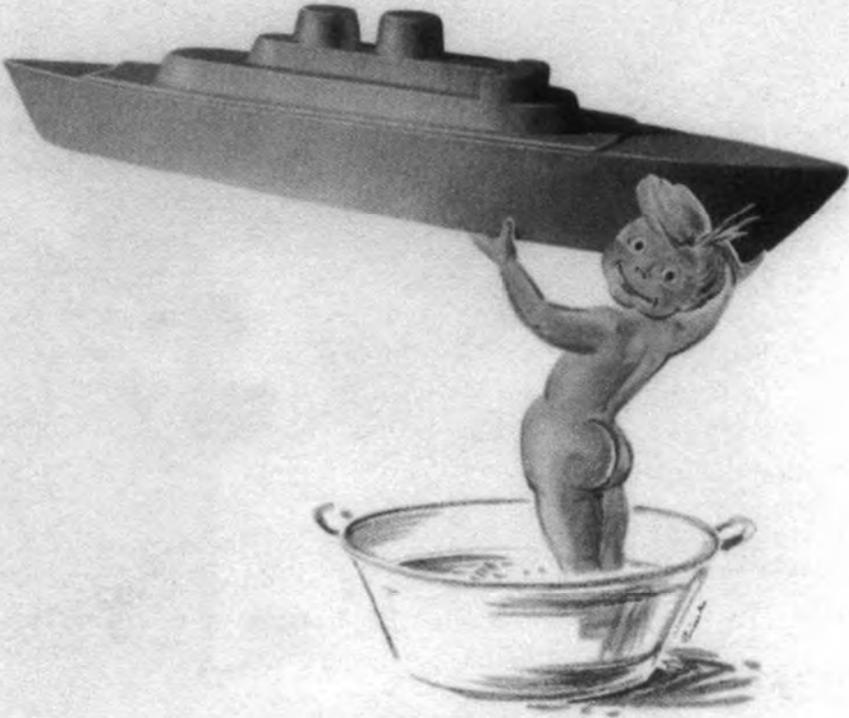
<sup>11</sup> (Scheirs and Priddy 2003)

<sup>12</sup> (Bledzki and Braun 1986)

<sup>13</sup> (Monsanto Company 2013)

<sup>14</sup> (BASF Mexicana S.A. de C.V. 2013)

„Das leichteste Schiff der Welt ist das STYROPOR-Schiffchen“.



### *Das leichteste Schiff der Welt...*

ist das STYROPOR-Schiffchen, dessen praktische Darstellung auf dem BASF-Stand anlässlich der Kunststoffmesse 1952 in Düsseldorf in erster Linie den Ingenieur und Techniker interessierte. Es ist 15 cm lang und wiegt ganze 5 Gramm, womit bereits eine der wesentlichen Eigenschaften von STYROPOR gekennzeichnet ist: sein geringes spezifisches Gewicht (von 0,025 an). Dazu kommen das sehr gute thermische und elektrische Isoliervermögen, die Beständigkeit gegen Wasser, Säuren und Laugen, sowie die hervorragende Strukturfestigkeit. Und was besonders wichtig ist: STYROPOR kann direkt in einfachen Arbeitsgängen zu porösen Formkörpern beliebiger Gestalt, wie z. B. Isolierbehältern, Platten, Schwimmern, Kugeln usw. verarbeitet werden.

Dieser neue BASF-Kunststoff wird als STYROPOR Blockmaterial, STYROPOR körnig und STYROPOR in Perlforn in den Handel gebracht.



*Badische Anilin & Soda Fabrik*

LUDWIGSHAFEN A. RHEIN

Ilustración 1-2 Fotografía promocional de la espuma de poliestireno para el stand de BASF en la feria de Kunststoffmesse en Dusseldorf, Alemania. (1952)

## El Poliestireno Expandido en la Actualidad (producción)

El Poliestireno se obtiene a partir de la polimerización del estireno, éste a su vez es un monómero plástico que se obtiene a partir del etileno.

Una vez que se extrae el petróleo crudo de los yacimientos, este pasa por un proceso térmico en el cual se separa en hidrocarburos de diferentes densidades. Este proceso llamado refinación se lleva a cabo en una caldera y posteriormente en una columna de destilación. El crudo pasa de la caldera donde se calienta a temperaturas cercanas a los 400°C y posteriormente a la columna de destilación donde al condensarse a distinta temperatura se separan los diferentes hidrocarburos. Ilustración 1-3

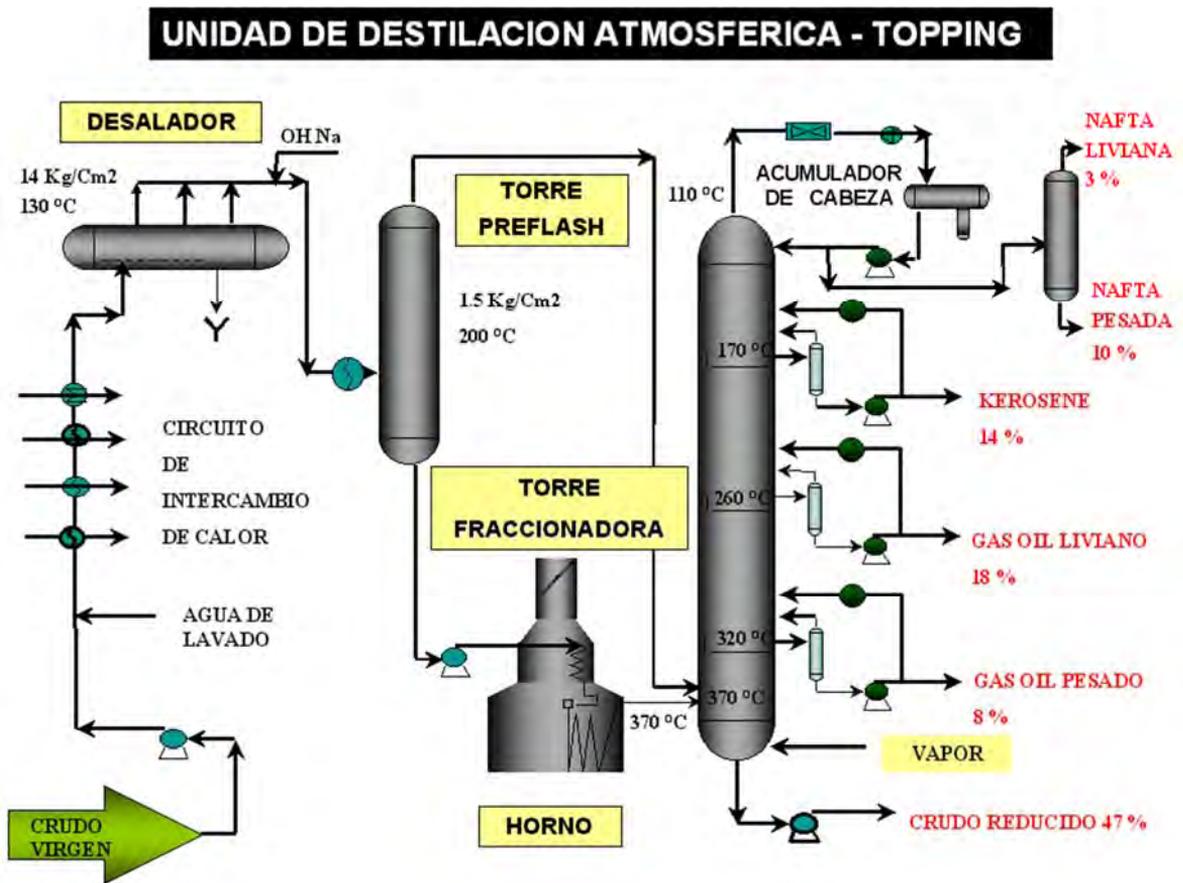


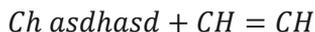
Ilustración 1-3 Unidad de destilación atmosférica de crudo

El gas de etileno se obtiene principalmente de hidrocarburos ligeros a través de un proceso denominado "Steam Cracking", en el cual los hidrocarburos se calientan a temperaturas entre 750 y 900 grados Celsius; induciendo numerosas reacciones de radicales libres seguidas por un súbito término de las mismas con el fin de cambiar las largas moléculas en partículas más pequeñas. El etileno es separado de la mezcla resultante por medio de ciclos

de compresión y destilación. Comúnmente se utiliza una mezcla de propano y etano para la obtención del etileno, ya que solo se requiere una torre de "quenching" con agua<sup>15</sup>.

El etileno es después usado para producir etilbenceno, un compuesto necesario previo a la producción de estireno.

El etilbenceno se obtiene combinando etileno y benceno en una reacción de alquilación<sup>16</sup>.



Una vez obtenido el etilbenceno este se deshidrata para obtener estireno e hidrógeno. Ilustración 1-4. El etilbenceno se mezcla en su fase gaseosa con vapor en una relación de 10 a 1 o 15 a 1. Finalmente esta mezcla pasa por una cama de catálisis sólida. La mayoría de la catálisis de la deshidratación del etilbenceno se basa en hierro III que es promovido por óxido de potasio o carbonato de potasio.

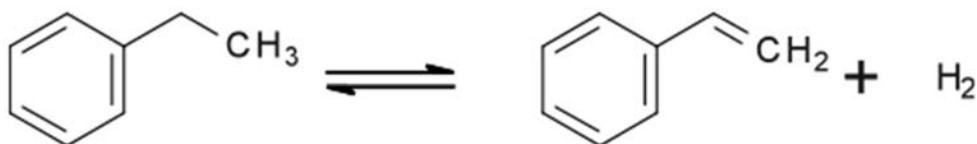


Ilustración 1-4 Reacción del etilbenceno en estireno e hidrógeno

El resultado es estireno, un líquido aceitoso transparente de olor dulce que forma la base para la producción de Poliestireno. Ilustración 1-5

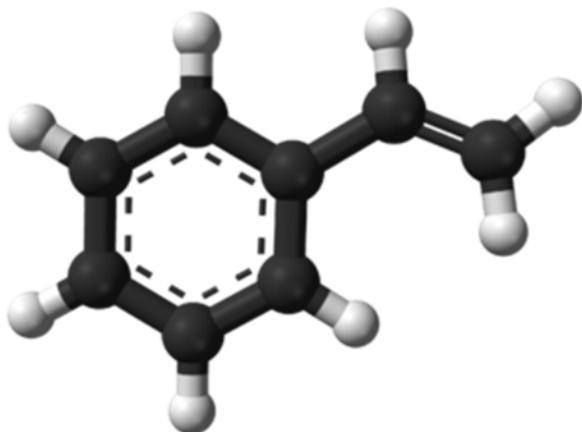


Ilustración 1-5 Molécula de Benceno

<sup>15</sup> (Kniel, Winter and Stork 1980)

<sup>16</sup> (James and Castor 2005)

Hoy en día el proceso de fabricación de perlas de Poliestireno expandido se realiza principalmente por medio de dos procesos, la polimerización suspendida del estireno en perlas esféricas que contienen al agente detonador, lo que lleva a un proceso de varias etapas y el de incorporación del agente detonante en la extrusión de Poliestireno común; este último proceso es más comúnmente usado para la producción de EPS para embalaje.

El primer proceso de producción permite el transporte de las perlas preformadas hasta un sitio de expansión final, donde se expandirán dentro de un molde a través de vapor.

La Ilustración 1-6 UOP EBOne™ Process describe el proceso de producción del EPS.

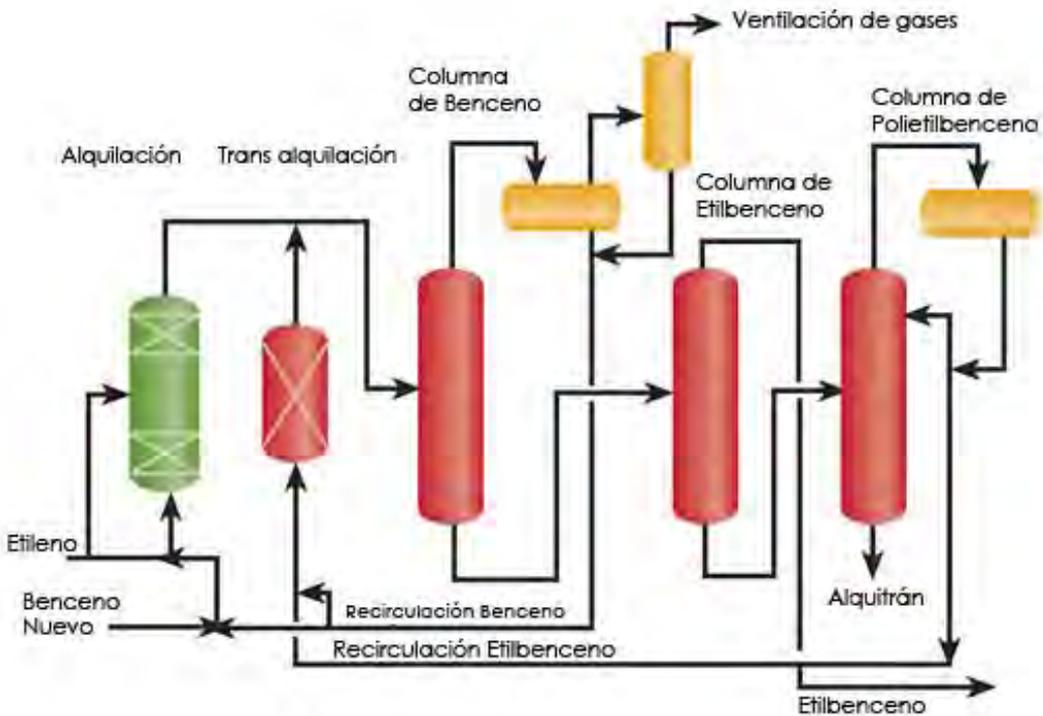


Ilustración 1-6 UOP EBOne™ Process

### Polimerización por suspensión

En este proceso de polimerización, el monómero en fase dispersa se polimeriza en un medio acuoso en el cual se añade un agente iniciador, el cual es soluble en aceite. El monómero se dispersa debido a la acción de un agitador dentro del reactor y por la acción de algún estabilizador soluble en agua formando pequeñas gotas sólidas de polímero. Las partículas creadas varían de entre 0.1 a 2 mm de radio, sin embargo para la formación de EPS como materia prima, se buscan tamaños de entre 0.4 a 1.6 mm<sup>17</sup>.

Al completarse la reacción, se libera al polímero del estabilizador lavándolo<sup>18</sup>. Posteriormente se seca el polímero.

### Preparación del reactor

Para la manufactura de EPS, la polimerización por suspensión es llevada a cabo en un reactor batch de camisa, junto con un mezclador y comúnmente dos deflectores<sup>19</sup>. El reactor es llenado con monómero de estireno y agua, así como los aditivos necesarios que hacen que el producto varíe de un fabricante a otro. Generalmente la concentración estireno-agua varía en concentraciones 60-40 o 40-60. El reactor se calienta gradualmente para iniciar la reacción de polimerización que típicamente se divide en varias etapas de calentamiento<sup>20</sup>.

### Polimerización

Se divide en dos etapas, la primera es la formación de las partículas de EPS y la segunda es la impregnación del agente detonante. En estas dos etapas se usan diferentes iniciadores, para la primera dibenzol peróxido en una temperatura aproximada de 90°C y para la segunda Ter-butyl peroxibenzoato en un rango de temperaturas de entre 115 a 130°C.<sup>21</sup>

### Impregnación

La adición del agente detonante al polímero se puede llevar a cabo antes o durante la polimerización,<sup>22</sup> este proceso se denomina impregnación.

La impregnación de ser realizada con demasiada antelación, incrementa el tiempo de la polimerización debido al efecto de la dilución,<sup>23</sup> mientras que una adición tardía solo se utiliza para el reciclaje de materiales de desecho<sup>24</sup>. El momento justo para inyectar el agente detonador a la mezcla es al momento de alcanzar un 66% de polimerización del estireno<sup>25</sup>.

---

<sup>17</sup> (Scheirs and Priddy 2003)

<sup>18</sup> (Billmeyer 1975)

<sup>19</sup> (Scheirs and Priddy 2003)

<sup>20</sup> (Bilgic, Karali and Savasci 1993)

<sup>21</sup> (Scheirs and Priddy 2003)

<sup>22</sup> (Chen, et al. 1999)

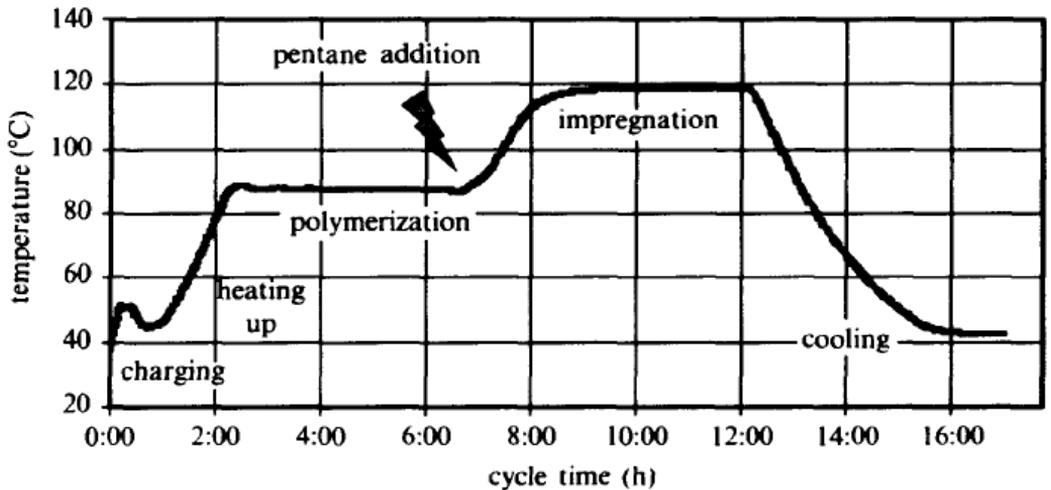
<sup>23</sup> (Villalobos, Hamielec and Wood 1993)

<sup>24</sup> (BASF 1992)

<sup>25</sup> (Konno, Arai and Seito 1982)

Los agentes detonadores son compuestos del tipo  $C_nH_m$  libres de halógeno, como el n-butano, isopentano, neopentano, n-pentano y hexano. Comúnmente se usa una mezcla de iso pentano y n-pentano.

Debido a la diferente tasa de difusión del iso y el n-pentano, se pueden generar diferentes propiedades según su concentración en la impregnación. Una cantidad mayor de isopentano, provoca que las perlas de EPS se puedan expandir durante mayor tiempo sin embargo obliga a un mayor tiempo de enfriamiento<sup>26</sup>. Gráfica 1-1



Gráfica 1-1 Gráfica temperatura tiempo para la producción de PS para expansión

### Formación de partículas y estabilización

En general la formación de perlas de EPS inicia en el reactor debido a la energía cinética que se genera debido a la agitación de las moléculas. A medida que el proceso continua, las perlas aumentan de tamaño hasta llegar a una fase de inestabilidad debida a la falta de un estabilizador en la suspensión, llamada fase pegajosa<sup>27</sup>.

Debido a que se requieren partículas de tamaños que satisfagan el mercado es necesario buscar un sistema de estabilización en esta fase que permita controlar el tamaño final de la perla. Estos sistemas de regulación se logran al añadir algunas macromoléculas de superficie activa como PVA, HEC o PVP. También se pueden añadir polvos inorgánicos como el TCP, también llamado pickering stabilizer.

<sup>26</sup> (Scheirs and Priddy 2003)

<sup>27</sup> Ibidem

### **Preformado**

En esta etapa las partículas de EPS son calentadas mediante vapor saturado por arriba de la temperatura de transición vítrea en una preforma. El agente detonador alojado en la matriz de Poliestireno se expande formando un sistema de celdas esférico. Durante esta etapa la perla de EPS puede expandirse por un factor de entre 40 y 80<sup>28</sup>

### **Maduración**

Después del proceso de preformado, se presenta un vacío dentro de la perla de EPS, debido al pentano remanente del preformado. En la maduración, la perla de Poliestireno Expansible se enfría por un periodo dado, de tal forma que penetre aire dentro de las celdas de la perla igualando la presión atmosférica. Sin embargo, si su almacenamiento dura demasiado tiempo, el pentano remanente escapa por la celda y esto disminuye el potencial de expansión de la perla en el molde.

### **Espumado final**

La versatilidad del Poliestireno Expandido es su facilidad de manejo, ya que la perla pre expandida puede tomar cualquier forma dentro de un molde donde se expande hasta su volumen final a través de la inyección de vapor en el molde.

---

<sup>28</sup> (Koppers 1962)

## Propiedades Físicas y Mecánicas

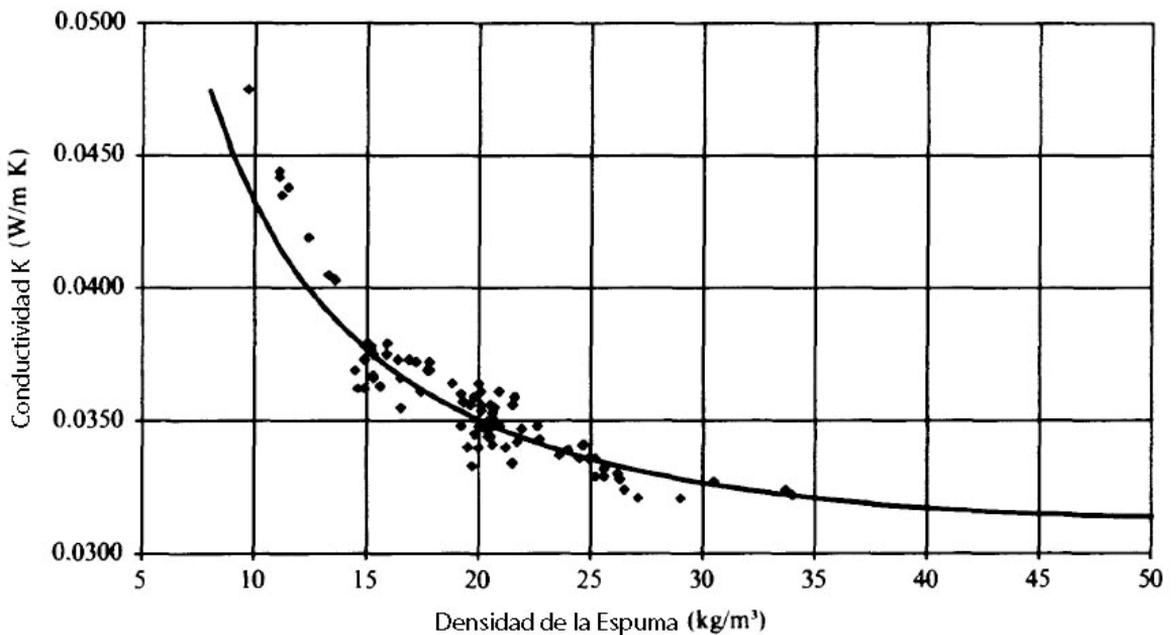
Antes de tomar acciones, se debe saber la forma del comportamiento de este material, sin embargo las propiedades de éste varían dependiendo de su densidad.

### Conductividad Térmica

Una de las propiedades más importantes de este material es la conductividad térmica, ya que al estar compuesto principalmente por aire, el material se comporta de forma aislante.

Esta propiedad varía dependiendo de la relación de Poliestireno y aire, es decir del grado de expansión del Poliestireno, la cual se refleja directamente en la densidad del material. A menor densidad, su conductividad térmica es menor.

Los valores de conductividad térmica para el EPS se han reportado con anterioridad por BSL/Dow y se presentan en la siguiente Gráfica 1-2

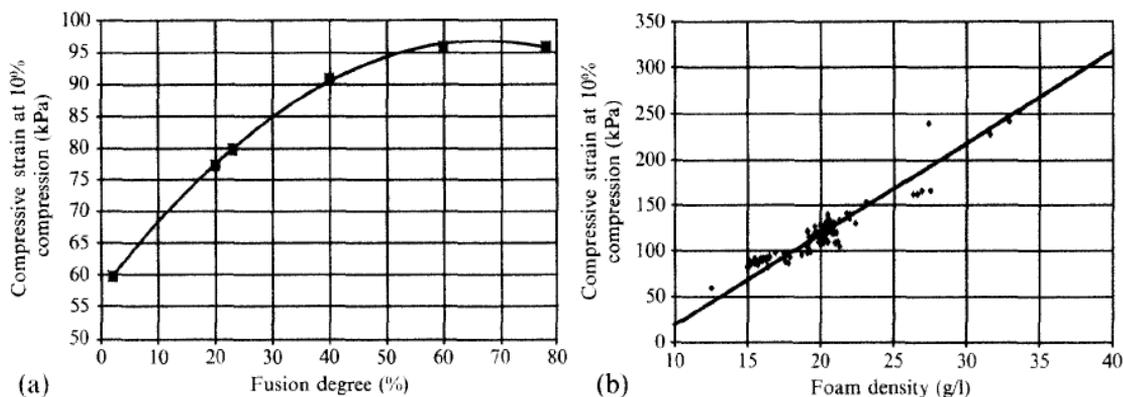


Gráfica 1-2 Conductividad térmica contra densidad del EPS

## Propiedades Mecánicas

Este material al ser una espuma semirrígida, no presenta una rotura espontánea de su estructura celular. Por esta razón un ensayo de tracción no es posible, así que se realiza un ensayo de deformación a compresión al llegar a comprimirse un 10%

De la misma manera que la conductividad estos datos ya han sido reportados con anterioridad<sup>29</sup>. Gráfica 1-3



Gráfica 1-3 Propiedades mecánicas del EPS

## Resumen

Otras propiedades de interés se reportan en la siguiente Tabla 1-1 Resumen de propiedades del EPS

### Propiedades

Constante Dieléctrica	2.4–2.7
Conductividad Eléctrica (s)	$10^{-16}$ S/m
Módulo de Young ( $E$ )	3000–3600 MPa
Elongación al quiebre	3–4%
Prueba Notch	2–5 kJ/m <sup>2</sup>
Temperatura de Transición Vítrea	100 °C
Punto de Fusión	240 °C
Vicat B	90 °C <sup>[9]</sup>
Calor Específico	1.3 kJ/(kg·K)
Absorción de Agua (ASTM)	0.03–0.1

Tabla 1-1 Resumen de propiedades del EPS

<sup>29</sup> (Scheirs and Priddy 2003)

## Usos del EPS

Debido a las propiedades antes mencionadas, el Poliestireno expandido es un material muy versátil y con muchas aplicaciones. Su bajo costo de producción permite que destaque en diversos mercados: embalaje, construcción, desechables, etc.

Por sus propiedades como aislante térmico y bajo peso, tiene un uso muy variado en la industria de la construcción, ya que se puede utilizar como aislante térmico dentro de las paredes, para reducir el peso en los entrepisos al colar los mismos o para nivelar los cimientos según las necesidades de algunos tipos de suelos.

Por otro lado, por su facilidad de manejo tiene un mercado considerable en la industria publicitaria para la realización de maquetas, anuncios, esculturas y otros. Al igual que en la producción de partes a partir de compuestos, como fibra de vidrio y kevlar, se utiliza para la fabricación de los moldes de éstas.

Mientras que sus propiedades ante la compresión permiten que sea un buen material para la atenuación de impactos. Por esta razón tiene un amplio uso en la industria automotriz y en el área de embalaje.

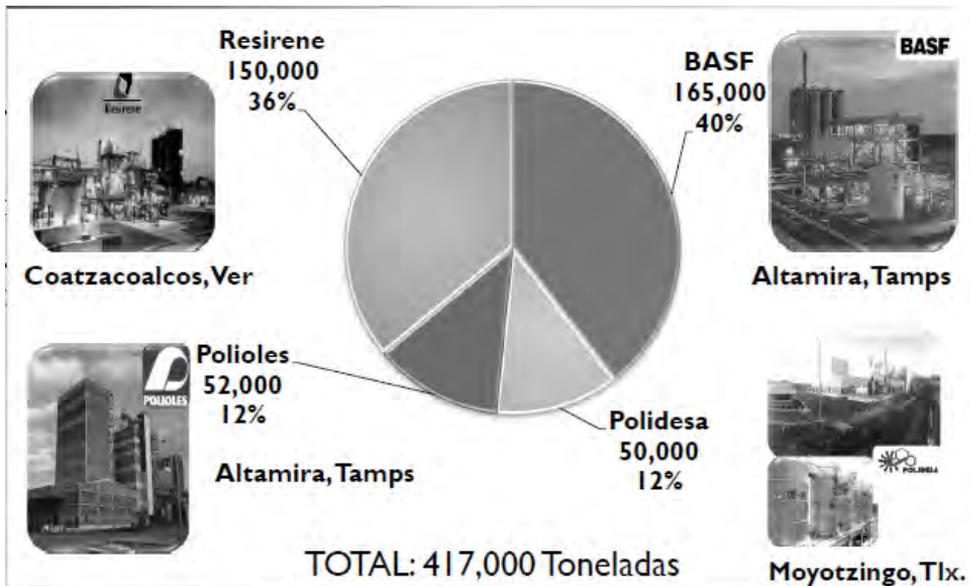
Finalmente por su bajo peso, propiedades térmicas y bajo costo de producción, hacen de éste un material ideal para la producción de desechables, generalmente vasos y charolas.

## Producción Actual

Actualmente la producción de Poliestireno Expandido en México representa el 1.25% de la producción de Poliestireno<sup>30</sup>, la cual se ve distribuida en la Gráfica 1-4 Propiedad del Instituto Mexicano del Plástico Industrial

---

<sup>30</sup> IMPI 2011



Gráfica 1-4 Propiedad del Instituto Mexicano del Plástico Industrial

## Reciclaje del EPS

El uso de contenedores desechables para alimentos y bebidas ha creado el problema de acumulación y posterior mal manejo de los mismos una vez utilizados; dejando residuos sólidos en grandes volúmenes que además de ocupar espacio, llegan a áreas naturales y las calles causando otros problemas (e.g., inundaciones) aunado al impacto ambiental debido en parte a su tiempo de degradación.

El desconocimiento general de que el EPS se puede reciclar y la poca o nula cultura de la separación de la basura y el reciclaje en nuestro país y en la misma comunidad nos provocan un serio problema; basta con ver los contenedores de “Orgánico”, “Inorgánico” y de PET para darse cuenta.

Por otro lado, la huella de carbono de los envases de EPS es menor en su proceso de fabricación que la de otros materiales alternativos, e incluso si el EPS es manejado adecuadamente después de su uso, este puede tener un impacto ambiental menor que sus similares biodegradables.

Como referencia, de las 39 millones de toneladas de residuos sólidos que se produjeron en 2010 en México 300,000 fueron de Poliestireno Expandido, siguiendo un consumo general de plásticos que se ha duplicado en la última década, lo que nos da una idea del impacto a gran escala que podría tener la implementación de programas de reciclaje en todo el país.

## 2 El reciclaje de plásticos en México

En el capítulo anterior se hace referencia al término "plástico" como un término que aglomera a los materiales poliméricos.

Este término se usa coloquialmente debido a que señala la propiedad común de estos materiales al reaccionar ante un esfuerzo, deformándose generalmente en una zona muy corta de forma elástica y en una mucho más grande y significativa deformándose plásticamente.

El título de este capítulo usa este término debido a lo coloquial del mismo, con el fin de acercar el presente trabajo a la comunidad en general, mientras que se busca informar a la misma sobre el desarrollo y evolución del conocimiento en materia de reciclaje de polímeros en el país.

La sociedad moderna se ha embarcado en un modo de vida basado en el consumismo, en el cual la vida útil de un producto se ha acortado de sobremano debido a los bajos costos de producción y la masificación de la misma debido a los eficientes sistemas de producción, es decir, vivimos en la cultura del "útese y tírese". Dada esta situación, el agotamiento de recursos se ha vuelto el principal problema a nivel mundial. Se han consumido los recursos de una manera tal que parecieran infinitos y al mismo tiempo se ha generado una gran cantidad de materiales de desecho.<sup>31</sup>

La recuperación de residuos y el reciclaje ofrecen un gran potencial para mejorar el manejo de recursos y disminuir la disposición de residuos; se prolonga la vida útil de los rellenos sanitarios y aminora la explotación de la materia prima virgen.

A medida que la población mundial continua creciendo a una tasa casi desmesurada, aumentando los requerimientos energéticos y la demanda de productos para consumo final; el reciclaje se torna una práctica casi obligada.

El reciclaje es aquel proceso en el que se reúsan los productos directa o indirectamente para transformarse en nuevos materiales.<sup>32</sup> Este proceso es una necesidad básica si se pretende iniciar un camino al desarrollo sustentable y una práctica que deben ejercer los productores, los distribuidores y los consumidores.

---

<sup>31</sup> (Damanhuri 2012)

<sup>32</sup> Ibidem

## La producción de desechos en el país

En nuestro país el tema de reciclaje hasta hace unos años era un tema tabú, sin embargo en pocos años se ha convertido en el tema de novedad y al menos en la capital del país se han implementado mecanismos legales en los que se estipula la separación de residuos como una obligación.

Desgraciadamente, estas prácticas aún son incipientes a tal grado que en el país se siguen importando desechos reciclados de otros países, p.e., en 2010 se importaron 6 millones de toneladas de residuos plásticos.<sup>33</sup> Así mismo la producción de desechos ha tenido un crecimiento considerable, sin embargo este no corresponde a la tasa que el crecimiento poblacional como se podría esperar si no a al crecimiento del PIB en las actividades terciarias.

PIB (Base 2003)		Producción de Residuos (Miles de Toneladas)		Crecimiento Poblacional	
<b>2000</b>	7,406.51	2000	30,733.30	2000	97,483.41
<b>2001</b>	7,394.06	2001	31,488.50	2005	103,263.39
<b>2002</b>	7,455.36	2002	32,173.60	2010	112,336.54
<b>2003</b>	7,555.80	2003	32,915.70		
<b>2004</b>	7,857.72	2004	34,603.40		
<b>2005</b>	8,103.68	2005	35,405.00		
<b>2006</b>	8,501.26	2006	36,135.00		
<b>2007</b>	8,810.14	2007	36,865.00		
<b>2008</b>	8,942.35	2008	37,595.00		
<b>2009</b>	8,398.75	2009	38,325.00		
<b>2010</b>	8,860.70	2010	39,055.00		

Tabla 2-1 Comparación entre PIB, Producción de residuos y crecimiento poblacional.

\*nota: Tómese en cuenta el crecimiento anual, no los valores puntuales.

Por otro lado la producción de residuos por entidad si es proporcional a la cantidad de habitantes de la misma Ver Tabla 2-2, esto se debe a que la tasa de crecimiento poblacional de las ciudades ha sido muy baja en comparación a las entidades con mayor cantidad de comunidades rurales.

<sup>33</sup> (Monroy 2010)

Entidad federativa	Producción RS	Población
Estados Unidos Mexicanos	<b>38,325.00</b>	<b>112 336 538</b>
<b>Aguascalientes</b>	376	1 184 996
<b>Baja California</b>	1,336.00	3 155 070
<b>Baja California Sur</b>	204	637 026
<b>Campeche</b>	248	822 441
<b>Coahuila de Zaragoza</b>	883	2 748 391
<b>Colima</b>	197	650 555
<b>Chiapas</b>	1,153.00	4 796 580
<b>Chihuahua</b>	1,263.00	3 406 465
<b>Distrito Federal</b>	4,782.00	8 851 080
<b>Durango</b>	493	1 632 934
<b>Guanajuato</b>	1,708.00	5 486 372
<b>Guerrero</b>	876	3 388 768
<b>Hidalgo</b>	642	2 665 018
<b>Jalisco</b>	2,767.00	7 350 682
<b>México</b>	6,314.00	15 175 862
<b>Michoacán de Ocampo</b>	1,106.00	4 351 037
<b>Morelos</b>	558	1 777 227
<b>Nayarit</b>	292	1 084 979
<b>Nuevo León</b>	1,971.00	4 653 458
<b>Oaxaca</b>	810	3 801 962
<b>Puebla</b>	1,770.00	5 779 829
<b>Querétaro</b>	577	1 827 937
<b>Quintana Roo</b>	442	1 325 578
<b>San Luis Potosí</b>	726	2 585 518
<b>Sinaloa</b>	902	2 767 761
<b>Sonora</b>	847	2 662 480
<b>Tabasco</b>	639	2 238 603
<b>Tamaulipas</b>	1,121.00	3 268 554
<b>Tlaxcala</b>	307	1 169 936
<b>Veracruz de Ignacio de la Llave</b>	2,070.00	7 643 194
<b>Yucatán</b>	573	1 955 577
<b>Zacatecas</b>	372	1 490 668

Tabla 2-2 Producción de residuos por entidad - (INEGI 2013)

Dada la producción de residuos sólidos en el país en los últimos diez años, podemos observar su composición y comportamiento (Tabla 2-3) donde la mayor tasa de crecimiento es la de los residuos plásticos.



Tipo de residuo	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Total reciclable generado	30,733.2	31,488.4	32,173.61	32,915.7	34,604	35,405	36,135	36,865	37,595	38,325	40,058.7
Papel, cartón, productos de papel	4,324.13	4,430.44	4,526.83	4,904.50	5,160.00	5,275.00	5,388.00	5,489.30	5,199.40	5,300.40	5,540.20
Textiles	457.92	469.18	479.39	497	520.1	530	542	552	537.6	548	572.8
Plásticos	1,346.11	1,379.20	1,409.20	2,014.40	2,115.80	2,161.80	2,208.00	2,223.00	4,094.10	4,173.60	4,362.40
Vidrios	1,813.25	1,857.82	1,898.24	2,156.00	2,210.00	2,262.00	2,309.00	2,341.00	2,210.60	2,253.50	2,355.50
Metales	891.26	913.17	933.03	1,046.70	1,160.00	1,186.10	1,210.00	1,298.00	1,293.20	1,318.30	1,377.90
Aluminio	491.728	503.8168	514.77761	586.152	606	620	633	650	650.4	663	693
Ferrosos	247.4006	253.4828	258.99748	282.609	329	336.1	343	410	407.5	415.4	434.2
Otros no ferrosos	152.1283	155.8683	159.25932	177.939	225	230	234	238	235.3	239.9	250.7
Basura de comida, jardines y materiales orgánicos similares	16,104.09	16,500.00	16,858.97	16,592.80	17,440.80	17,968.00	18,335.00	18,576.00	19,707.30	20,090.00	20,998.80
Otro tipo de basura (residuos finos, hules, pañal desechable, etc.)	5,796.24	5,938.74	6,067.94	5,704.30	5,995.80	6,022.00	6,143.00	6,385.70	4,552.80	4,641.20	4,851.20

Tabla 2-3 Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de residuo, 2000 a 2010 (Miles de toneladas) (INEGI 2013)

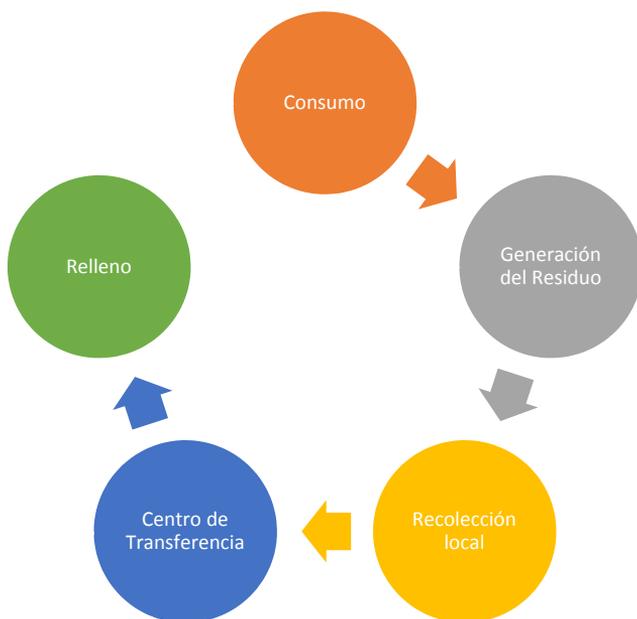
## Potencial de Reciclaje de los desechos

Los datos estadísticos presentados anteriormente, representan cifras correspondientes a los residuos que llegan a rellenos sanitarios y rellenos de tierra, por tanto no contemplan a todos los tiraderos clandestinos ni la basura separada localmente en los sitios de generación, cuestión presentada debido a las deficiencias de los municipios para manejar sus residuos.

Sin embargo, los desechos que llegan a los rellenos tienen un gran potencial económico, ya que para al menos el 35% de ellos es factible su reciclaje, mientras que 52%, perteneciente a materia orgánica, podría usarse para la producción de energía. Actualmente la recuperación de los residuos con potencial de reciclaje roza el 4%<sup>34</sup> del total de residuos producidos, dejando un 31% de material sin aprovecharse, generalmente por su grado de contaminación.

## El camino de la basura

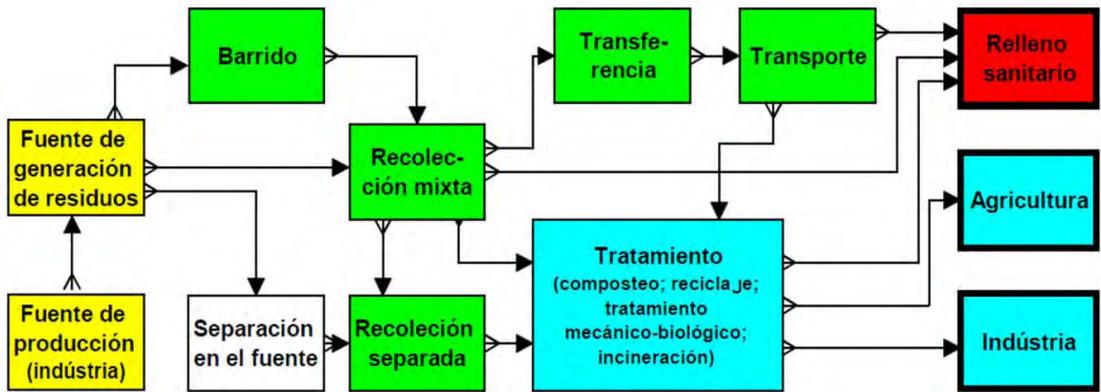
Dada la autonomía de cada municipio, existe la libertad en el método y logística de recolección de residuos, sin embargo a grandes rasgos después del acopio en los hogares por los camiones recolectores, son transportados al centro de transferencia, en donde se hace una preclasificación, separando residuos orgánicos e inorgánicos. Posteriormente se transportan mediante tractocamiones a los rellenos en donde se genera uno de los subempleos más demandados del país, la pepena o clasificación a gran escala.



Gráfica 2-1 Ciclo de consumo y desecho. El Reciclaje no está presente.

<sup>34</sup> (INEGI 2013)

Por otro lado, un esquema funcional para el manejo y recolección de residuos, manejo de residuos sólidos diferenciado, se puede apreciar en la Gráfica 2-2 Manejo de residuos sólidos diferenciado., el cual le da una valorización a los residuos generados y los reincorpora al ciclo de producción.



Gráfica 2-2 Manejo de residuos sólidos diferenciado.<sup>35</sup>

### Legislación en materia de Residuos Sólidos

El actual marco legal con el que se rige el manejo de residuos sólidos a nivel nacional es gestionado a través de la SEMARNAT y de los gobiernos locales, ya que se estipula en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) que será obligación de cada municipio la recolección y disposición de los residuos sólidos urbanos.

Sin embargo en las leyes referentes a residuos sólidos, las cuales se pueden consultar en línea, existen lagunas en cuanto al manejo y disposición de los mismos, además de no ser vigente su sanción.

#### Leyes vigentes

- Artículo 115, párrafo III, sección C
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente 2003
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
- NOM-083-SEMARNAT-2003
- Ley de Residuos Sólidos del DF

<sup>35</sup> (Wehenpohl 2009)

## Antecedentes en el manejo de residuos plásticos

Los productos fabricados a partir de materiales poliméricos, desde su creación, han sido una comodidad de la cual hoy en día no podemos prescindir y han tenido un lugar muy especial en la cultura moderna, a tal grado de llegar a ser tema del cual hablaran The Beatles en sus canciones.<sup>36</sup>

El consumo desmedido comenzó a crear problemas graves de disposición de residuos, en los cuales estos materiales debido a su composición, no se degradaban en los rellenos sanitarios, lo cual no genera un problema de contaminación más de espacio muerto del relleno para otros materiales susceptibles a la degradación.

Los plásticos al ser derivados del petróleo, estos poseen un alto contenido energético y monetario, por lo que el encontrarse sin uso y quitando espacio a otros materiales dentro de los rellenos sanitarios se vuelve una situación crítica a partir de la cual a principios de la década de los 80 los gobiernos estatales de Estados Unidos comienzan con programas de recolección y separación de residuos plásticos.

Los primeros programas de recolección (Principios de los 80) surgen en centros comerciales por iniciativa gubernamental, siendo estos en un principio para la recolección de envases de refrescos fabricados en PET. Posteriormente es lanzado un programa de recolección de garrafas de jugo, las cuales se fabrican en Polietileno de Alta Densidad.

Para 1986 en Estados Unidos se cuenta con 310 compañías dedicadas al reciclaje de plásticos post-consumo. Mientras que la cifra creció considerablemente para 1999, con 1677.<sup>37</sup>

Para ayudar a esta misión, la Sociedad de la Industria Plástica, (SPI, por sus siglas en inglés), desarrolla un sistema de identificación de polímeros en 1988.

El código se desarrolló para satisfacer las necesidades de los recicladores y brindar a los productores un sistema consistente que se pudiera aplicar a nivel nacional. El sistema ofrecía los medios para identificar los residuos plásticos que se encontraban con mayor frecuencia en los rellenos sanitarios de la época.

La SPI en conjunto con ASME lanza en 2010 la norma ASTM D7611 / D7611M – 10, sobre la práctica estándar para etiquetar artículos manufacturados de plástico para su correcta identificación. La ASTM hace modificaciones, siendo la última publicada durante la realización de esta tesis en junio de 2013, bajo el título “ASTM D7611 / D7611M – 13”.

---

<sup>36</sup> (Beatles 1969)

<sup>37</sup> (The American Chemistry Council 2013)

Resin Identification Number	Resin	Resin Identification Code –Option A	Resin Identification Code –Option B
1	Poly(ethylene terephthalate)	 PETE	 PET
2	High density polyethylene	 HDPE	 PE-HD
3	Poly(vinyl chloride)	 V	 PVC
4	Low density polyethylene	 LDPE	 PE-LD
5	Polypropylene	 PP	 PP
6	Polystyrene	 PS	 PS
7	Other resins	 OTHER	 O

Ilustración 2-1 Código de identificación visual para resinas plásticas ASTM D7611-13

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos en materia ambiental, la realidad es que los polímeros requieren un proceso más complejo para su reciclaje que otros productos, debido a su alto peso molecular y a procesos entrópicos por los que algunos plásticos pasan durante su producción. Esta situación limita en gran medida el grado de “reciclabilidad” de los mismos. Por otro lado el desarrollo tecnológico avanza constantemente para permitir el reciclaje de los mismos de una manera más sencilla.

## La situación en México

Actualmente en nuestro país la situación en materia de reciclaje es precaria, ya que aparte de un retraso tecnológico de 10 años, el plástico en general no cuenta con un valor en el mercado. No es hasta hace un par de años cuando el Polietilentereftalato (PET) y el Polietileno de alta densidad (HDPE) son monetarizados<sup>38</sup> y se crea un mercado para los mismos, sin embargo los demás polímeros siguen sin valorarse comercialmente en el mercado nacional.

Mientras el aluminio, el fierro, el papel y el vidrio se compran en las empresas recicladoras, el plástico usado tiene un bajo valor de compra.<sup>39</sup> Por otro lado los productos plásticos en general presentan un bajo peso, lo cual beneficia al productor y al consumidor, sin embargo obliga al recolector a reunir una mayor cantidad de volumen en relación al peso, lo que afecta directamente al costo de transporte del material al centro de reciclaje.

Por otro lado, un factor que hace que la industria del reciclaje de plástico sea incipiente en nuestro país son las fluctuaciones en el precio del petróleo, las cuales no permiten monetarizar los residuos plásticos a un valor constante durante un periodo relativamente largo de tiempo.

---

<sup>38</sup>Monetarización por kilo para el PET y el HDPE; \$5 para el primero y \$2 para el último, mayo de 2012

<sup>39</sup> (García 2006)

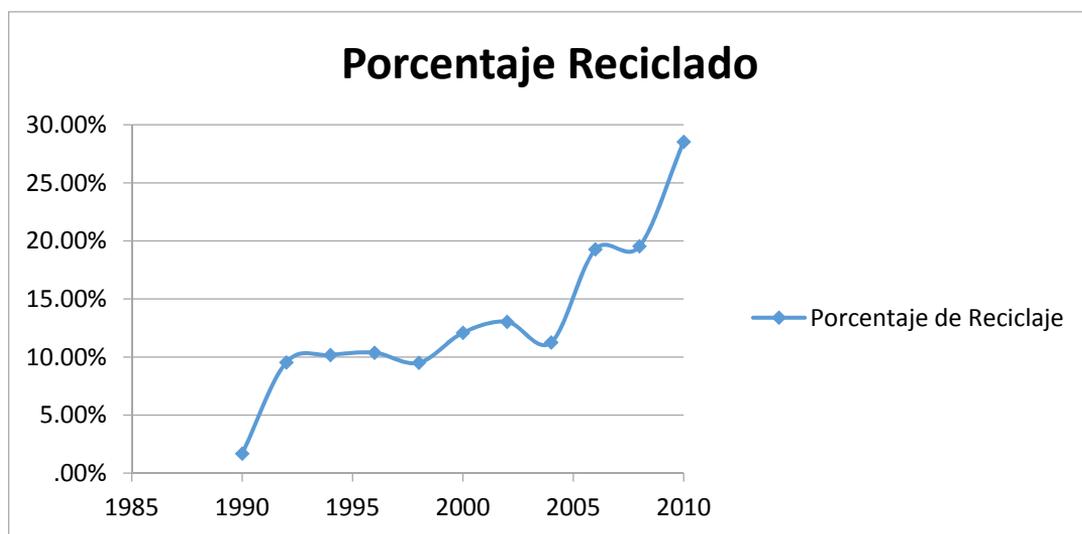
## Desarrollos previos en el manejo de EPS en el mundo

(Disposición, reúso y reciclaje)

Con el boom de los recicladores hacia finales de los 80 en Estados Unidos, algunos de los mismos incursionan en el manejo de EPS, sin embargo solo reciclando el material de embalaje e industrial. La insipiencia del reciclaje de unisol termina en la siguiente década, ya que para en 1990, de contar con tres millones de libras, se pasa a 20.8 millones de libras recolectadas en 1992.<sup>40</sup> Ver Tabla 2-4, Gráfica 2-3

Año	Volumen Recolectado	Volumen Vendido	Porcentaje Reciclado
1990	3.00	179.00	1.7%
1992	20.80	218.00	9.5%
1994	24.20	238.00	10.2%
1996	22.50	217.00	10.4%
1998	19.20	202.00	9.5%
2000	24.90	206.00	12.1%
2002	26.20	201.00	13.0%
2004	25.00	222.00	11.3%
2006	32.00	166.00	19.3%
2008	33.60	172.00	19.5%
2010	37.10	130.00	28.5%

Tabla 2-4 Crecimiento del acopio de EPS



Gráfica 2-3 Incremento del porcentaje de reciclaje de EPS

Los procesos de reciclaje de unisol en la época solamente eran físicos y se limitaban al densificado en mecánico y al termodensificado. Estos sistemas de reciclaje, al igual que los

<sup>40</sup> (Alliance of Foam Packaging Recyclers, 2010)

existentes en la época se basan en un proceso de ingeniería inversa a través del cual se convierten de nuevo en materia prima.<sup>41</sup>

### El Densificado Mecánico

El método de densificado mecánico o densificado en frío, es un proceso de compactación en el cual el unicel es prensado mediante fuerza hidráulica. El Poliestireno se compacta en un ratio de 8 a 1, es decir, su volumen se reduce en un 87%. Los bloques compactados posteriormente pueden ser transportados reduciendo los costos de los fletes al poder transportar una mayor cantidad de residuos. Generalmente este proceso solo se utiliza para la transportación o para la disposición final del residuo.



*Ilustración 2-2 Pacas de EPS densificado*

### El Termodensificado

Este proceso es por el cual el Poliestireno Expandido puede convertirse en materia prima de Poliestireno por medio su descomposición a través de calor y presión. Esto se logra mediante una extrusora.

En este proceso, el material de desperdicio pasa por un triturador que lo divide en partículas de menor tamaño y las arroja a la garganta de la extrusora, donde es llevado a través del husillo. El material se desplaza entre el husillo y el barril, al cual están adheridas resistencias eléctricas para aumentar la temperatura del material. Finalmente el material sale del barril pasando por el dado de extrusión.

---

<sup>41</sup> (García 2006)

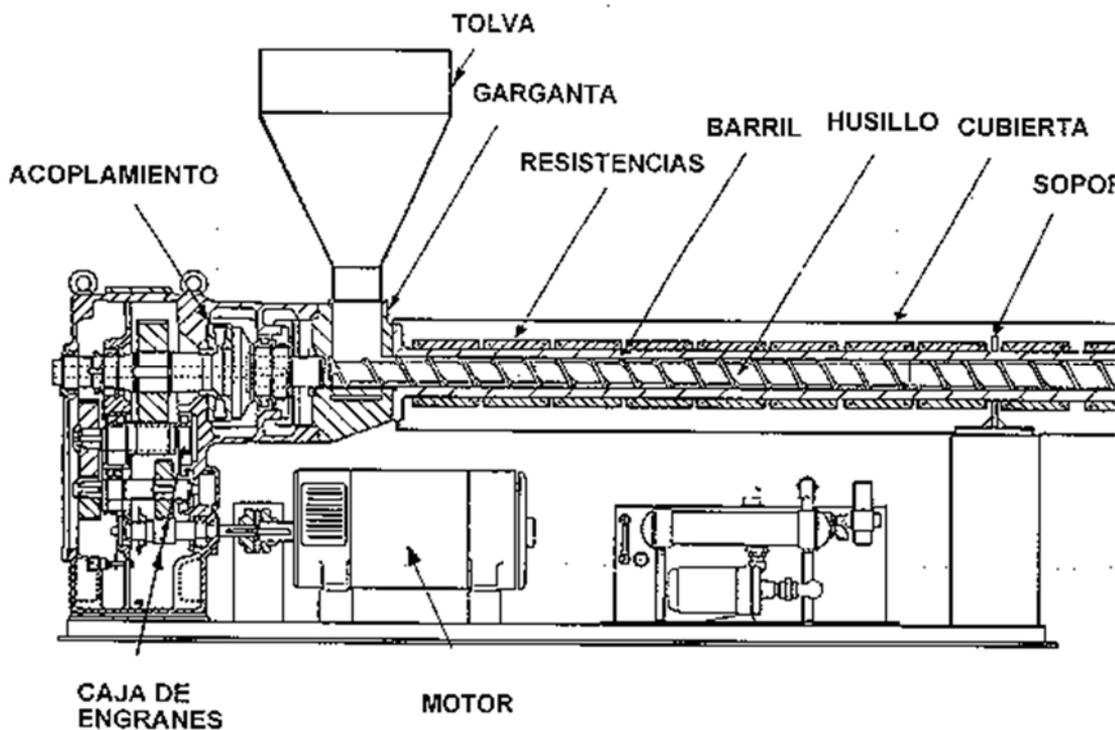


Ilustración 2-3 Esquema típico de una extrusora<sup>42</sup>

El material que surge del dado es materia prima virgen sin procesar, sin embargo se puede dejar caer en un molde para su transporte o directamente pasar al proceso de pelletización.

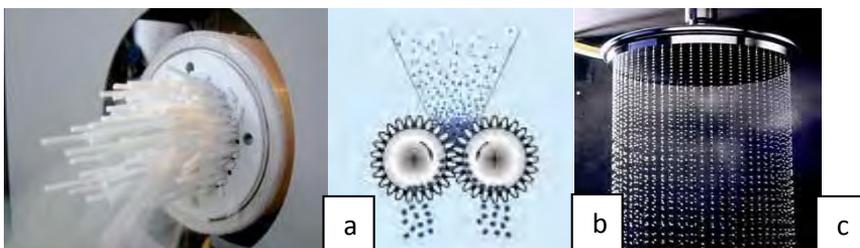
<sup>42</sup> (IMPI 2009)



*Ilustración 2-4 Salida del material del dado*

El proceso de pelletizado consiste en transformar el material obtenido en la extrusora en pellets, trozos muy pequeños del material, los cuales pueden ser comercializados como materia prima para la industria plástica.

Este proceso se puede realizar de tres formas; por trozado, por engranes o por goteo. El pelletizado por trozado implica que la salida del dado sea tan pequeña como el grueso que se requiere del pellet, colocando una trozadora rotativa frente al dado. (Ilustración 2-5 Procesos de Pelletizadoa), por otro lado el proceso con engranes lo que realiza es trozar elementos de mayor tamaño por medio de dos engranes no conectados. (Ilustración 2-5 Procesos de Pelletizado b), finalmente en el pelletizado por goteo el material fundido que sale del dado, gotea en una cama de agua formando pequeñas gotas de material rígido. Ilustración 2-5 Procesos de Pelletizado



*Ilustración 2-5 Procesos de Pelletizado*

## Otros desarrollos

Los primeros estudios realizados en materia de reciclaje de Poliestireno Expandido fueron realizados por Sony Corp., en 1997, donde ellos descubren que a través del d-limoneno, un aceite refinado de la cáscara de cítricos como la naranja, mandarina y toronjas, es posible procesar el uncel. Este aceite natural funciona como solvente del Poliestireno expandido, teniendo prácticamente la misma capacidad solvente que el tolueno a temperatura ambiente.<sup>43</sup>

El proceso mediante el cual funcionó el programa piloto de Sony, llamado "Orange R-net" era el acopio y reducción del EPS en el sitio, donde después era transportado a una planta de reciclaje donde se refinaba el producto y se separaba el Poliestireno del d-limoneno. El Poliestireno era después procesado y pelletizado para venderse como materia prima.<sup>44</sup>



Ilustración 2-6 Ciclo del programa Orange R-net de Sony

<sup>43</sup> (Noguchi, et al. 1998)

<sup>44</sup> (Sony 2003)

La compañía inclusive, a través de un estudio de ciclo de vida, hizo un comparativo con los procesos con los que se contaba en la época para la producción de materia prima de Poliestireno. Ilustración 2-7 Sony Corp

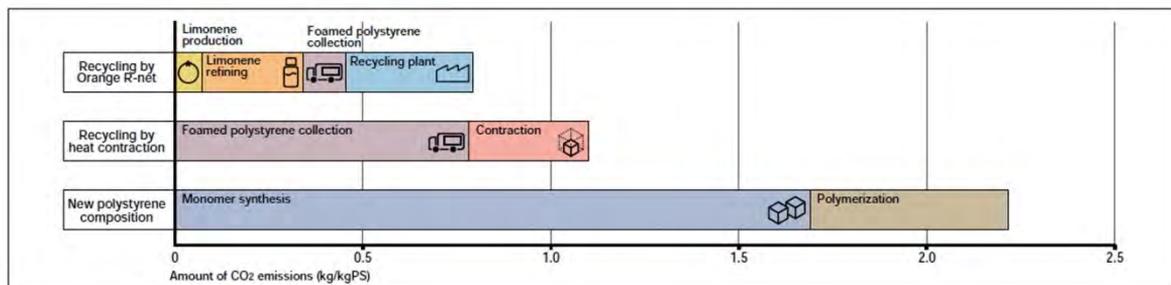


Ilustración 2-7 Sony Corp.

Sin embargo el desabasto alimentario en años futuros y el alto costo de la infraestructura para el reciclaje hizo insostenible este proceso.

### El reciclaje del EPS en nuestro país.

Basado en el mismo funcionamiento de disolución del Poliestireno expandido en d-limoneno y con base en la tecnología de disolución, pasó a ser parte del dominio público<sup>45</sup>, las personas se dieron cuenta de las propiedades adhesivas del material disuelto.

A partir de la disolución en d-limoneno, se pueden obtener tres productos dependiendo de la concentración de EPS en el aceite. Si es una concentración baja, se obtiene un recubrimiento sellador o barniz, si aumenta la concentración se puede utilizar como pegamento de baja resistencia y finalmente maximizar la cantidad de unicel y recrear el escenario del programa Orange R-net de Sony, donde se obtiene materia prima densificada.

Estos experimentos fueron replicados con éxito en México hasta el 2010, por Javier Adrián García Pineda, del Laboratorio de Superficies del Departamento de Fisicoquímica de la Facultad de Química.<sup>46</sup> Sin embargo a la fecha no se ha creado ningún desarrollo industrial basado en este método en el país.

Por otro lado el 16 de junio del mismo año, DART de México, inaugura en Atlacomulco, Estado de México, un centro de reciclaje a pequeña escala. El cual se basa en el proceso de termodensificado, en el cual solo se densifica el material el cual posteriormente se pelletiza por terceros.

<sup>45</sup> (Noguchi, et al. 1998)

<sup>46</sup> (García Pineda 2010)

# 3 Proceso de Diseño

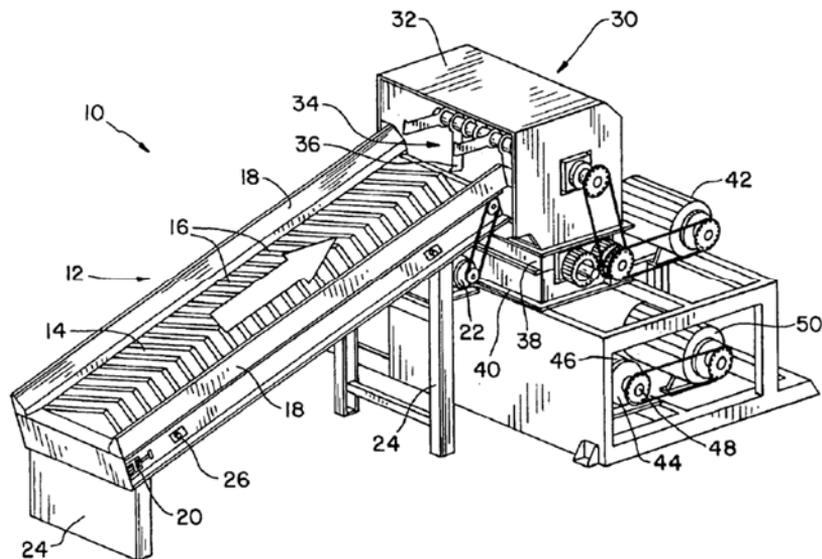


Ilustración 3-1 Sistema de reciclaje por calentamiento y extrusión<sup>47</sup>

## Requerimientos y especificaciones

Requerimiento	Especificación
Procesar unicel sucio	Capacidad para procesar EPS post-consumo
Fácil venta del producto final	Capacidad de producir pellets
Calidad del producto final	Pellets sin material infundido
Producción igual o mayor a la actual	5 a 12 kg/h
Bajo consumo energético	Menor o igual a 15 kW
Bajo costo de fabricación de la máquina	Costo máximo de la máquina \$150,000 MXN
Mantenimiento sencillo	Uso de piezas comerciales del mercado nacional

<sup>47</sup> (Moon 2010)

## Ecodiseño y sustentabilidad

Entendamos por diseño sustentable al desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades.<sup>48</sup>

Esta definición nos permite diferenciar el ecodiseño del diseño sustentable, el primero adapta los parámetros de diseño a las necesidades y requerimientos ambientales y ecológicos de éste momento; mientras que el diseño sustentable además de tomar en cuenta las necesidades ambientales, toma en cuenta otros aspectos, conocidos como pilares de diseño sustentable.

### Pilares de sustentabilidad

**Ambiente:** El objetivo es preservar y enriquecer el ecosistema local y global, evaluando y mejorando el impacto del diseño en el medio ambiente.

**Sociedad:** El proyecto debe proponer un desarrollo que mejore la salud y el bienestar de una comunidad, dando oportunidades de trabajo y promoviendo la creación de negocios, crecimiento personal, educación, salud y aprendizaje de por vida

**Economía:** Implica que el producto debe ser rentable debido a prácticas claras de negocios, con beneficios de costo apreciables gracias a la implementación de políticas estratégicas de sustentabilidad tales como conservación de agua y energía.



Ilustración 3-2 Definición de sustentabilidad

Una herramienta para evaluar la sustentabilidad de un producto es la rueda LiDS, *Lifecycle Design Strategies*, que se basa en factores de ciclo de vida y sustentabilidad de los materiales para definir 8 ejes de comparación.

<sup>48</sup> (Bollana 2007)

Rueda estratégica de ecodiseño comparativa entre diseño propio (REPS01) y Benchmark.

**1 Desarrollo de un nuevo concepto**

- Desmaterialización
- Uso compartido del producto
- Integración de funciones
- Optimización funcional del producto y componentes del producto

**5 Optimización sistema de distribución**

- Packaging: Menos/ Más limpio /Reusable
- Modo de transporte energéticamente eficiente
- Logística energéticamente eficiente

**2 Selección de materiales de bajo impacto**

- Materiales limpios
- Materiales renovables
- Menor contenido energético en materiales
- Materiales reciclados
- Materiales reciclables

**6 Reducción del impacto durante el uso**

- Menor consumo de energía
- Fuente de energía más limpia
- Necesita menos consumibles
- Consumibles más limpios
- Sin desperdicio de energía
- Sin consumibles

**3 Reducción de uso de materiales**

- Reducción en peso
- Reducción en volumen a transportar

**7 Optimización de vida útil**

- Confiabilidad y durabilidad
- Fácil mantenimiento y reparación
- Estructura de producto modular
- Diseño clásico
- Fuerte relación usuario-producto

**4 Técnicas para optimizar la producción**

- Técnicas alternativas de producción
- Menor cantidad de pasos de producción
- Menor consumo energético al fabricar
- Energía más limpia al fabricar
- Menos insumos y consumibles y/o más limpios

**8 Optimización del sistema de fin de vida**

- Reuso del producto
- Refabricación
- Reciclado de materiales
- Desarmabilidad
- Recuperabilidad de materiales
- Incineración segura



Gráfica 3-1 Rueda de ecodiseño

# 4 Resultados

## Manufactura

A continuación se muestran algunas imágenes de las piezas manufacturadas.



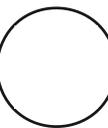
*Ilustración 4-1 Garganta de alimentación tangencial modificada, Barra hueca 3" y Solera de 1/2" AISI 1018*



*Ilustración 4-2 Pre ensamble del molino sobre la estructura de la zona de extrusión*



*Ilustración 4-3 Manufactura del husillo, AISI 416, en CNC de 4 ejes (SOMAQ)*



# 5 Conclusiones

Se logró el objetivo.

Se concluyó la manufactura de un prototipo que permite la correcta plastificación del material.

Se evaluó el prototipo.

## Trabajo a futuro

Se deja a la consideración del lector las siguientes observaciones.

Parametrizar la máquina para diferentes tipos de EPS, XPS o polímeros espumados de densidad aparente menor a 30 gramos por litro.

Fomentar el acopio y reciclaje de EPS en la Ciudad Universitaria y buscar la creación de un programa de acopio institucional.

Fomentar dentro del tema de “Design for X” el diseño sustentable.

Buscar mejorar las habilidades de manufactura de los alumnos de ingeniería mecánica.

# 6 Bibliografía

- Alliance of Foam Packaging Recyclers,. "2010 EPS Recycling rate report." 2010.
- ANIPAC. *Anuario Estadístico*. Ciudad de México: Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C., 2012.
- APTIS. *GranuHeaP as new tool*. Octubre 2013. <http://www.aptis.be/application-notes/pharmaceutical-applications/granuheap-as-new-tool/?lang=en> (accessed Octubre 2013).
- ASTM . "Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification ." *ASTM D7611 / D7611M - 13*. ASTM International, 2013.
- BASF Mexicana S.A. de C.V. *Historia de BASF*. Mayo 23, 2013. [http://www.basf.com.mx/Mexico/home/interior.jsp?cve\\_seccion=1&cve\\_subseccion=4&cve\\_contenido=82](http://www.basf.com.mx/Mexico/home/interior.jsp?cve_seccion=1&cve_subseccion=4&cve_contenido=82) (accessed Mayo 23, 2013).
- BASF, Aktiengesellschaft. Process of preparing expandable thermoplastic polymers by postimpregnation. Patent EP0575871 B1. 1992.
- Beatles, The. *Polythene Pam*. Comp. Paul Mc Cartney John Lenon. 1969.
- Berger, K.C., and G Meyerhoff. *Polymer Handbook*. NY: Wiley, 1989.
- Biard, Donald, and Dimitris Collias. *Polymer Processing, Principles and Design*. John Wiley & Sons, 1998.
- Bilgic, T, M Karali, and O.T. Savasci. "Effect of the particle size of the solid protective agent tricalcium phosphate and in-situ formation on the particle size of suspension polystyrene." *Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1993.
- Billmeyer, Fred W. . *Ciencia de los polímeros*. Reverte, 1975.
- Bledzki, A, and D Braun. "Initiation of polymerization with substituted ethanes." *Polymer Bulletin*, 1986: 16.
- Bollana, Kaul. *Metodología del diseño. Ecodiseño y Sustentabilidad. Metodología de diseño ecoeficiente y sustentabilidad de productos y actividades ecológicas*. Universidad de Buenos Aires, 2007.
- Brinkmann-Rengel, S, and N Niessner. "Synthesis of Polystyrene—Polyacrylate Block Copolymers by Nitroxide-Mediated Radical Polymerization." *ACS Symposium Series (ACS)*, 2000: 334-346.
- Chen, Z, W Pauer, H.U. Moritz, J Pruss, and H. J. Warnecke. "Modeling of the suspension polymerization process using a particle population balance." *Chemical Engineering & Technology*, 1999: 22.
- Chung, C.I. *Extrusion of Polymer*. Hanser, 2000.
- Damanhuri, Enri. *Post-Consumer Waste Recycling and Optimal Production*. Rijeka, Croatia: InTech, 2012.

*Encyclopedia Britannica*. 1995.

Franklin Associates, a division of ERG. "Life cycle inventory of foam polystyrene, paper-based, and PLA foodservice products." LCA, Kansas, 2011.

García Pineda, Javier Adrián. *Poliestireno residual : productos alternos*. Ciudad Universitaria: UNAM, 2010.

García, Arnulfo. *Recomendaciones táctico - operativas para implementar un programa de logística inversa, estudio de caso en la industria del reciclaje de plásticos*. 2006.

Hahn, Klaus, Maria Lorenz, and Michael Witt. Process of preparing expandable thermoplastic polymers by postimpregnation. EP Patent EP0575871 B1. Marzo 13, 1996.

Hiatt, P. D., and J Bartelt. *Journal of the American Chemical Society*, 1959: 81.

IMPI. *La Enciclopedia del Plástico*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2009.

INEGI. *INEGI*. Abril 11, 2013.

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb311&s=est&c=33223>  
(accessed Mayo 16, 2013).

James, Denis H. , and William M. Castor. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.

Kniel, Ludwig, Olaf Winter, and Karl Stork. *Ethylene, keystone to the petrochemical industry*. M. Dekker, 1980.

Konno, M, K Arai, and S Seito. "The effect of stabilizer on coalescence of dispersed drops in suspension polymerization of styrene." *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1982: 15.

Koppers, Corporation. Foamed polymer particles of distinctive shape and method of making same. US Patent 3023 175. 1962.

MatWeb. *MatWeb, AISI 1018 Steel, cold drawn*. Mayo 30, 2013.

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a9cc570fbb24d119f08db22a53e2421&ckck=1> (accessed Mayo 30, 2013).

—. *MatWeb, Lead, Pb*. Mayo 30, 2013.

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ebd6d2cdfdca4fc285885cc4749c36b1> (accessed Mayo 30, 2013).

Monroy, María. "Industriales compran basura importada." *CNN Expansión*, Octubre 27, 2010.

Monsanto Company. *Monsanto*. Marzo 2013. <http://www.monsanto.com.mx/historia.htm>  
(accessed Diciembre 2012).

Moon, Yongsoon. Expanded polystyrene recycling and heat extruding system. US Patent 20100102475A1. Abril 29, 2010.

Myers, Jeff. *IMPROVED SCREW DESIGN FOR MAXIMUM CONDUCTIVE MELTING*. Paper, Antec, 2002.

- Noguchi, T., M. Miyashita, Y. Inagaki, and H. Watanabe. *A new recycling system for expanded polystyrene using a natural solvent*. 1998.
- Ostromislensky, Iwan. Process for manufacturing plastic compositions and products obtained thereby. US Patent 1613673. Enero 11, 1927.
- Plastics Europe. *An analysis of European plastics production*. Bruselas, Bélgica: Plastics Europe, 2009.
- Rauwendaal, Chris. *Polymer Extrusion*. Cincinnati: Hanser, 1994.
- Rodmand, Hugh. Process and apparatus for the preexpansion of vinyl polymeric materials. US Patent 3023175. Febrero 27, 1962.
- Scheirs, John, and Duane Priddy. *Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers*. Wiley, 2003.
- Sony. "Orange R-net Programme." 2003.
- The American Chemistry Council. *Plastics Help Us To Do More With Less In Many Ways*. Noviembre 2013. <http://plastics.americanchemistry.com/Sustainability-Recycling>.
- Universidad de Antofagasta. *Universidad de Antofagasta*. Mayo 30, 2013. <http://www.uantof.cl/caim/Asignaturas/ProcesosII/FORJA.pdf> (accessed Mayo 30, 2013).
- Villalobos, M. A., A. E. Hamielec, and P. E. Wood. "Bulk and suspension polymerization of styrene in presence of n-pentane: an evaluation of monofunctional and bifunctional initiation." *Journal of Applied Polymer Science*, 1993: 50.
- Wang, Lei, Wen-zhong Jin, De-wen Zhao, and Xiang-hua Liu. "Solution of rectangular bar forging with bulging of sides by strain rate vector inner-product." *Elsevier*, 2010.
- Wehenpohl, Günther. "3er Congreso Interamericano de Residuos Sólidos de AIDIS." *Gestión de Residuos y eficiencia en recursos*. Buenos Aires, Argentina, 2009.
- Wikipedia. *Golden section search - Wikipedia, the free encyclopedia*. Mayo 29, 2013. [http://en.wikipedia.org/wiki/Golden\\_section\\_search](http://en.wikipedia.org/wiki/Golden_section_search) (accessed Mayo 29, 2013).

# 7 Apéndice A: Tabla de ilustraciones

Ilustración 1-1 Fotografía del proceso de los Diez Galones. (Propiedad de Dow Chemical) ..9	
Ilustración 1-2 Fotografía promocional de la espuma de poliestireno para el stand de BASF en la feria de Kunststoffmesse en Dusseldorf, Alemania. (1952).....11	11
Ilustración 1-3 Unidad de destilación atmosférica de crudo .....12	12
Ilustración 1-4 Reacción del etilbenceno en estireno e hidrógeno.....13	13
Ilustración 1-5 Molécula de Benceno.....13	13
Ilustración 1-6 UOP EBOne™ Process.....14	14
Ilustración 2-1 Código de identificación visual para resinas plásticas ASTM D7611-13.....30	30
Ilustración 2-2 Pacas de EPS densificado .....33	33
Ilustración 2-3 Esquema típico de una extrusora.....34	34
Ilustración 2-4 Salida del material del dado.....35	35
Ilustración 2-5 Procesos de Pelletizado.....35	35
Ilustración 2-6 Ciclo del programa Orange R-net de Sony .....36	36
Ilustración 2-7 Sony Corp. ....37	37
Ilustración 3-11 Proyección de cúmulos de gránulos obtenidos con GranuHeap comparación de cuatro gránulos: arcilla, polímero, lactosa y polvos metálicos.....	
Ilustración 3-12 husillos comerciales para alto factor de bulto.	
Ilustración 3-13 Calentamiento en la dosificación .....	
Ilustración 3-14 Calentamiento en la zona de compresión y dosificación ....	
Ilustración 3-15 Diagrama eléctrico de control de la máquina	
Ilustración 3-16 Definición de sustentabilidad.....39	39
Ilustración 4-1 Garganta de alimentación tangencial modificada, Barra hueca 3" y Solera de 1/2" AISI 1018 .....41	41
Ilustración 4-2 Pre ensamble del molino sobre la estructura de la zona de extrusión .....42	42
Ilustración 4-3 Manufactura del husillo, AISI 416, en CNC de 4 ejes (SOMAQ) .....42	42
Ilustración 4-4 Ensamble de la garganta con el husillo, arrastre manual de partículas .....43	43
Ilustración 4-5 Prototipo REPS-01 – “Lola” .....43	43

# 8 Apéndice B: Tablas

Tabla 1-1 Resumen de propiedades del EPS.....	19
Tabla 2-1 Comparación entre PIB, Producción de residuos y crecimiento poblacional. ....	23
Tabla 2-2 Producción de residuos por entidad - (INEGI 2013).....	24
Tabla 2-3 Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de residuo, 2000 a 2010 (Miles de toneladas) (INEGI 2013).....	26
Tabla 2-4 Crecimiento del acopio de EPS.....	32



## 9 Apéndice C: Gráficas

Gráfica 1-1 Gráfica temperatura tiempo para la producción de PS para expansión .....	16
Gráfica 1-2 Conductividad térmica contra densidad del EPS.....	18
Gráfica 1-3 Propiedades mecánicas del EPS .....	19
Gráfica 1-4 Propiedad del Instituto Mexicano del Plástico Industrial.....	21
Gráfica 2-1 Ciclo de consumo y desecho. El Reciclaje no está presente. ....	27
Gráfica 2-2 Manejo de residuos sólidos diferenciado. ....	28
Gráfica 2-3 Incremento del porcentaje de reciclaje de EPS.....	32
Gráfica 3-1 Diagrama funcional .....	•
Gráfica 3-2 Rueda de ecodiseño.....	40