

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL SOLVENTE Y CATALIZADOR  
EN LA DEPOLIMERIZACIÓN VÍA GLICÓLISIS EN FASE LÍQUIDA DE  
RESIDUOS PLÁSTICOS TIPO PET”**

## **TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:**

**JOSÉ LUIS LAMA MANAYAY**

**LIMA – PERÚ  
2010**

## **DEDICATORIA**

**A Graciela...  
por haber sido la  
luz a través del túnel**

**A Guillermo...  
por enseñarme que la  
adversidad sólo sirve para  
hacernos grandes**

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis agradecimientos dirigidos a:

Ing. César Osorio Carrera, profesor de la Escuela de Ingeniería Química, asesor de este proyecto final de carrera, por su ayuda, orientación y consejos recibidos.

Los integrantes del departamento de Control de la Calidad, de la empresa QUIMPAC S.A., por la oportunidad de realizar en sus instalaciones las pruebas más importantes de este trabajo de investigación.

Maribel Mauricio, por su paciencia y apoyo incondicional en esta investigación.

A César y Maggy Lama, Carlos La Rosa, Reynaldo Manayay, Lidia y Nelly More por todo el apoyo que me dieron, sin el cual no hubiera podido terminar este trabajo.

Y a mi familia, por su apoyo constante e incansable día tras día.

## CONTENIDO

Dedicatoria	.....	ii
Agradecimientos	.....	iii
Resumen	.....	ix
Abreviaturas	.....	x
Introducción	.....	11
Capítulo I		
MARCO METODOLÓGICO	.....	12
1.1 Planteamiento del Problema	.....	12
1.2 Antecedentes de la investigación	.....	20
1.2.1 Glicólisis Batch	.....	20
1.2.2 Glicólisis Continua	.....	24
1.3 Formulación del Problema	.....	25
1.3.1 Problema General	.....	25
1.3.2 Problemas Específicos	.....	25
1.4 Justificación de la Tesis	.....	26
1.5 Objetivos de la Tesis	.....	28
1.5.1 Objetivo General	.....	28
1.5.2 Objetivos Específicos	.....	28
1.6 Hipótesis de la Tesis	.....	29
1.6.1 Hipótesis General	.....	29
1.6.2 Hipótesis Específicas	.....	29
1.7 Diseño Metodológico	.....	29
1.7.1 Tipo de estudio	.....	29
1.7.2 Metodología de investigación	.....	30

## Capítulo II

LA INDUSTRIA DE PLÁSTICOS PET EN EL PERÚ .....	44
2.1 Evolución, estructura e importancia del sector .....	47
2.1.1 Evolución del consumo y de la producción .....	48
2.1.2 Importaciones en la estructura competitiva del sector .....	53
2.1.3 Evolución de los precios en la industria .....	56
2.1.4 Inversiones en el sector .....	58
2.2 Perspectivas del sector .....	61
2.3 Situación ambiental del sector .....	63
2.4 Composición de los residuos sólidos urbanos .....	65
2.5 Consumo de plásticos y generación de residuos plásticos urbanos .....	65

## Capítulo III

EL POLIETILÉN TEREFALATO (PET) .....	69
3.1 Síntesis del PET .....	72
3.1.1 Transesterificación de ácido tereftálico y etilenglicol .....	72
3.1.2 Transesterificación de dimetiltereftalato y etilenglicol .....	74
3.2 Propiedades del PET .....	75
3.2.1 Propiedades estructurales .....	75
3.2.2 Propiedades físicas .....	76
3.2.3 Propiedades eléctricas .....	76
3.2.4 Propiedades químicas .....	77
3.2.5 Propiedades térmicas .....	77
3.2.6 Propiedades mecánicas .....	78
3.2.7 Propiedades ópticas .....	78
3.3 Usos y Aplicaciones .....	79
3.4 Tecnologías de reciclaje .....	79

Capítulo IV	
MARCO TEÓRICO	82
4.1 Catálisis molecular	82
4.1.1 Catálisis ácido – base	83
4.1.2 Catalizadores y tipos de catalizadores	89
4.1.3 Catálisis organometálica	92
4.2 Mecanismos de catálisis en fase acuosa	94
4.3 Reciclaje químico vía depolimerización química	99
4.3.1 Reacción de transesterificación	101
4.3.2 Glicólisis	105
4.3.3 Metanólisis	106
4.3.4 Hidrólisis	107
4.4 Estudios de viscosidad en soluciones diluidas	108
4.5 Depolimerización química vía glicólisis de los residuos plásticos tipo PET	110
4.5.1 Parámetros de operación	111
4.5.2 Mecanismo de la reacción	115
4.5.3 Cinética de la reacción	116
Capítulo V	
DISEÑO EXPERIMENTAL	119
5.1 Condiciones experimentales de las pruebas de glicólisis de PETW	120
5.2 Preparación de la muestra	122
5.3 Prueba de referencia	124
5.4 Pruebas de glicólisis de solución	124
5.5 Determinación del peso molecular del PETW	128
5.6 Análisis de productos	129
Capítulo VI	
PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	131
6.1 Análisis de las muestras de PETW	131
6.1.1 Análisis granulométrico	131
6.1.2 Determinación del peso molecular	131

6.2 Efecto de la concentración del solvente y catalizador .....	138
6.2.1 Pruebas de glicólisis de PETW .....	138
6.2.2 Determinación de las condiciones óptimas del proceso ...	145
6.2.3 Prueba de confirmación .....	148
6.3 Análisis del producto obtenido .....	150
6.4 Estudio de la cinética de la reacción .....	158
Capítulo VII	
COSTO DEL PROCESO A NIVEL DE LABORATORIO	161
7.1 Cálculo del costo de las materias primas .....	161
7.1.1 PET acondicionado .....	161
7.1.2 Etilénglicol .....	162
7.1.3 Acetato de Zinc .....	162
7.2 Cálculo del costo de la energía de los equipos utilizados .....	162
7.2.1 Costo de la energía de calefacción .....	162
7.2.2 Costo de la energía de filtración .....	163
7.2.3 Costo de la energía de refrigeración .....	163
7.3 Costos totales .....	164
7.4 Análisis económico .....	164
CONCLUSIONES .....	166
RECOMENDACIONES .....	168
BIBLIOGRAFÍA .....	169
ANEXOS .....	175
Anexo N° 01 Manual de operación del agitador magnético	
CIMAREC .....	176
Anexo N° 02 Análisis de productos .....	190
A2.1 Espectros IR de productos .....	191
A2.2 Resultados de punto de fusión de materia prima y productos .....	196

Anexo N° 03	Datos y tablas .....	198
	A3.1 Generación de RSU por distrito en Lima, 2000-2008 .....	199
	A3.2 Generación per cápita de RSU por distrito en Lima 2007 .....	201
	A3.3 Resumen de las bandas más importantes de absorción IR .....	203
	A3.4 Constantes Físicas del PET .....	212
	A3.5 MSDS Bis hidroxietil tereftalato .....	218
	A3.6 MSDS Etilenglicol .....	223
	A3.7 MSDS Acetato de Zinc .....	229



## RESUMEN

El tema de este trabajo es el reciclaje de residuos plásticos, enfocado en el proceso de reciclaje químico del polietilén tereftalato (PET) característico de los Residuos Sólidos Urbanos de la ciudad de Lima, para obtener el monómero bis-hidroxiethyl tereftalato (BHET). Aunque los procesos más comunes de reciclaje de plásticos son métodos mecánicos, los beneficios y oportunidades que ofrece el reciclaje químico lo convierte en uno de los más interesantes procesos a desarrollar; teniendo en cuenta que el consumo de PET está alcanzando niveles muy altos, debido al incremento de sus aplicaciones en muchos sectores industriales. El reciclaje químico de PET incluye la recuperación de materia prima de alto valor y ofrece varias posibilidades de desarrollo: metanólisis, hidrólisis, glicólisis, entre otros; siendo la glicólisis el método seleccionado en el presente trabajo de investigación debido a que el proceso no requiere temperaturas ni presiones elevadas que encarecerían los equipos necesarios y porque el proceso en sí, es el más sencillo de los mencionados.

La reacción de glicólisis se llevó a cabo en un agitador magnético con sistema de calefacción eléctrico incorporado, usando etilenglicol (EG) como solvente y acetato de zinc (AcZn) como catalizador. La temperatura de operación fue de 195-197°C a presión atmosférica con una velocidad de agitación de 450rpm durante 90 minutos. La relación en peso EG:PET fue estudiada para tener una visión general del comportamiento de la reacción y rendimiento teniendo en cuenta la influencia del exceso de solvente. Se trabajó con relaciones EG:PET (w.w) desde 2.16:1 a 7.57:1. La concentración de acetato de zinc fue variada hasta optimizar la respuesta del sistema, con relaciones de AcZn:PET (w:w) desde 3:100 hasta 17:100. El producto obtenido fue caracterizado con técnicas de espectroscopia infrarroja (IR) y complementado con la verificación de su punto de fusión para establecer su identidad.

Los resultados de las pruebas realizadas concluyen que la relaciones en peso óptimas de etilenglicol como solvente y acetato de zinc como catalizador con relación al PET son 6.25:1 y 14:100, respectivamente, logrando un rendimiento de BHET del 76.49%. El modelo cinético desarrollado fue correlacionado con los datos experimentales para validarlo, mostrando una muy buena relación con los mismos. La constante de la velocidad de reacción calculada fue igual a  $0.0016\text{l}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ , con un coeficiente de regresión para el modelo igual a 0.991.

## ABREVIATURAS

A continuación se indican las abreviaturas utilizadas para designar materiales plásticos y sustancias citadas a lo largo de la tesis, así como otros conceptos de cierta importancia.

<b>AcMg</b>	Acetato de magnesio
<b>AcZn</b>	Acetato de zinc
<b>BHET</b>	Bis(hidroxietyl) tereftalato
<b>DEG</b>	Dietilenglicol
<b>DMT</b>	Dimetil tereftalato
<b>EG</b>	Etilenglicol
<b>HDPE</b>	Polietileno de alta densidad
<b>LDPE</b>	Polietileno de baja densidad
<b>MetOH</b>	Metanol
<b>MHET</b>	Mono(hidroxietyl) tereftalato
<b>PBT</b>	Polibutilén tereftalato
<b>PET</b>	Polietilén tereftalato
<b>PETW</b>	Residuos tipo PET
<b>PP</b>	Polipropileno
<b>PS</b>	Poliestireno
<b>PVC</b>	Cloruro de polivinilo
<b>RSU</b>	Residuos sólidos urbanos
<b>TA</b>	Ácido tereftálico

## INTRODUCCIÓN

El polietilén tereftalato (PET) es un poliéster termoplástico que muestra excelentes propiedades térmicas y mecánicas. El PET es un plástico muy versátil en ingeniería que es usado principalmente en la manufactura textil y de envases, así como en empaques, películas fotográficas, videos y cintas de audio. La rápida mejora de la industria de producción del PET llevó inevitablemente a un aumento en la presencia de éste en los residuos industriales y de post-consumo. La principal fuente de residuos PET hoy en día, son los envases de bebida post -consumo. En la manufactura de plásticos tipo PET, los residuos industriales son generados en varias etapas de la producción e incluyen prepolímeros PET, oligómeros, polvo y grumos de polímero, productos de mala condición, etc.

El reciclaje químico de PET incluye los procesos de glicólisis, metanólisis, hidrólisis y procesos similares. El proceso de reciclado químico de PET por glicólisis puede realizarse de varias maneras: empleando glicoles diversos, variando condiciones de presiones y temperaturas del proceso de reacción, utilizando diferentes tiempos de operación o empleando equipos de distinto tipo. El reciclado de PET residual por glicólisis es el más habitual cuando el reciclado químico es escogido como estrategia de tratamiento de residuos de PET. Este hecho, se debe en cierto modo, a la no utilización de presiones elevadas en la reacción de obtención de monómeros, lo que implica costos menores de los equipos a utilizar.

Debido al aumento de la presencia de PET en los residuos sólidos urbanos (RSU), se plantea el reciclado químico por glicólisis como una estrategia de gestión de los residuos del polímero, posibilitando la obtención de monómeros con una calidad comparable a productos vírgenes, a partir de un material residual.

El trabajo presenta un análisis de la situación de la industria de plásticos en el Perú, así como su impacto ambiental. Se propone el tratamiento del PETW vía depolimerización por glicólisis, determinando experimentalmente la cinética de este proceso y las concentraciones óptimas de etilenglicol y acetato de zinc como solvente y catalizador, respectivamente, tomando como referencia las condiciones de operación establecidas como referencia en otros trabajos de investigación.

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **1.1 Planteamiento del Problema**

El aumento en el consumo de los plásticos en la sociedad moderna, que se estima crece un 4% anualmente, se ha producido en paralelo con el desarrollo tecnológico de estos materiales, cuyo uso se ha extendido además de en el campo ya convencional de los envases, en la fabricación de componentes en las industrias automotriz, construcción, textil y todo tipo de bienes de consumo. Así el consumo mundial de materiales plásticos ha pasado de las 10 mil TM en 1978 hasta las 60 mil TM en el año 2000 (Arandes, Bilbao y López, 2004). El consumo de plásticos en Perú en el 2008 fue de 2,18 mil TM (PRODUCE, 2008).

Sin embargo, el éxito en el desarrollo tecnológico no ha llevado emparejada la previsión de reciclaje de los productos, política de reciente actualidad y que condiciona ya la propia filosofía de fabricación. Se estima que se recupera o recicla menos del 15% de los materiales plásticos residuales. Los plásticos contenidos en los residuos sólidos urbanos son mayoritariamente polietileno, polietilén tereftalato y polipropileno (alrededor del 70%) y en menor proporción están el poliestireno, cloruro de polivinilo, poliestireno-butadieno, poli(metacrilato de metilo), etc. (PRODUCE, 2008).

Una rápida reflexión sobre la situación actual en el aprovechamiento de los plásticos nos lleva a las siguientes conclusiones: Los plásticos, por su composición y su origen derivado del petróleo y por tanto de una materia prima agotable, son un residuo de alto valor, relativamente fácil de recuperar y abundante (tanto o más que el vidrio en los residuos domésticos y creciente entre los residuos industriales). Paradójicamente no ha sido objeto de un recojo selectivo y prácticamente la mayoría de lo que se ha recuperado procede de las plantas de tratamiento de residuos

domésticos. En conjunto, el porcentaje de recuperación del plástico utilizado en diferentes sectores industriales es muy bajo.

La explicación de esta situación se debe a varios motivos:

- El envase plástico no es retornable como las botellas de vidrio. Por ejemplo, las experiencias de retornos con el plástico de PET llevado a cabo en Alemania se han abandonado por su ineficacia y coste.
- Su baja densidad eleva el coste de transporte, haciendo imprescindible su rotura o compresión para el transporte a los centros de reciclaje.
- La diversidad de materiales plásticos, de diferente composición, exige una separación en las familias antes de ser reciclado, complicando el recojo selectivo.

Las diversas aplicaciones de la resina plástica tipo PET, empleada como material de envase y embalaje, no existirían si no hubiera una amplia gama de productos químicos que se añaden, en muy pequeñas cantidades, a los plásticos para conseguir modificar alguna propiedad. A estos productos se les llama aditivos.

Los aditivos ayudan a la protección del contenido del envase. Cuando el producto contenido en un envase tiene una cierta inestabilidad a las radiaciones UV de la luz solar, por ejemplo, debe evitarse que estas radiaciones atraviesen las paredes del envase. Esto puede conseguirse mediante la adición de cargas y pigmentos haciendo el plástico totalmente opaco, mediante la adición de absorbentes UV o las combinaciones de ambos. Las aplicaciones son múltiples, desde los envases de medicamentos hasta el retractilado aplicado a los palets, con la finalidad de proteger la mercancía embalada.

Los distintos tipos de aditivos que se pueden usar en la industria del envase y embalaje son:

- **ANTIESTÁTICOS.** Son aditivos de naturaleza orgánica que, añadidos a los plásticos, incrementan la conductividad superficial disminuyendo las cargas electrostáticas.
- **BLANQUEANTES ÓPTICOS.** Los blanqueantes ópticos se emplean en los plásticos para mejorar su color inicial, obtener un envase más blanco y aumentar su brillo en otros negros o pigmentados.

- **CARGAS Y REFUERZOS.** Las cargas son aditivos sólidos que se añaden a los plásticos para modificar sus propiedades. Inicialmente se usaron para reducir el coste del envase. Hoy día se continúa empleando, a pesar del bajo coste de los plásticos, porque aportan mejora de algunas propiedades mecánicas.
- **ESTABILIZANTES DE PROCESO.** Se utilizan para estabilizar un polímero frente a la degradación térmica y/o de proceso. El PET se estabiliza con aditivos denominados antioxidantes.
- **ESTABILIZANTES A LA LUZ.** La radiación denominada ultravioleta es la causante de la degradación de los plásticos. Además de la radiación UV la temperatura, la humedad y la contaminación también deben ser tenidos en cuenta. La temperatura hace que a la degradación por efecto de los rayos UV se le sume la termooxidativa que a veces puede llegar a ser superior a la UV
- **LUBRICANTES.** Facilitan el procesado de los plásticos, mejorando las propiedades de flujo y reduciendo la adherencia de los elementos fundidos a las partes de la maquinaria. Además de la función principal ofrecen propiedades antibloque (antiapelmazantes); antitacking (evitan el pegado de las hojas o láminas ya producidas); efecto antiestático, así como la mejora del color o la resistencia al impacto.
- **NUCLEANTES.** Reflejan propiedades físico-mecánicas (mayor transparencia y menor fragilidad).
- **PLASTIFICANTES.** Confieren características de flexibilidad, extensibilidad y procesabilidad. También mejoran el aspecto y brillo de las superficies, reducen la capacidad de cargarse electrostáticamente, reducen la fricción y bajan la temperatura de transición vítrea.

La cantidad y tipo de aditivos agregados al proceso durante la producción de la resina le confiere características propias de calidad al PET.

El valor de los materiales plásticos de desecho debe contemplarse también estratégicamente más allá de la situación actual del mercado de crudos petrolíferos, el cual está sujeto a complejos avatares

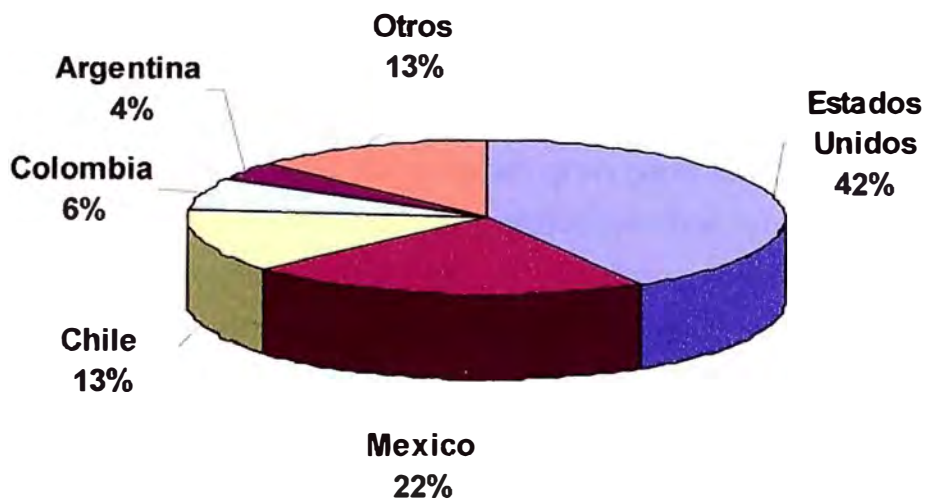
socioeconómicos. Para la fabricación de productos plásticos de base se parte del crudo de petróleo, que en último término produce plásticos (un 4%) y carburantes (el 96% restante) (Arandes, et. al., 2004). Contemplando ambos mercados en competencia, el aumento de la producción de plásticos implica producir menos combustibles o aumentar la importación y destilado del petróleo bruto. Desde esta perspectiva, la importancia de reciclar el plástico cobra así una dimensión inexistente en otros materiales y ayuda considerablemente a justificar su reciclado.

Nuestro país no es un productor de resina PET, toda la resina que se usa en las plantas que fabrican insumos de plástico, especialmente botellas, de este material la importan de diversos países en forma de preformas, existiendo por lo tanto en nuestro mercado diferentes calidades de resina, convirtiéndolo así en un mercado bastante heterogéneo en cuanto a calidades de productos plásticos tipo PET.

El país de donde proviene la mayor cantidad de preformas importadas son los Estados Unidos y representa el 58.7% del total importada en el periodo 2000-2009; seguido por México. Estos dos países son los lugares más importantes para importar Preforma PET (ambos tienen el 64% del mercado de importación de preformas para Perú).

Durante el periodo de 2000 a Setiembre 2009, los principales países de importación de resina PET por parte de los empresarios nacionales fueron Estados Unidos (63.2%), Taiwán (13.1%) y Venezuela con el 10.9%, los demás países tienen cuotas más pequeñas de participación en el segmento de este mercado de resinas PET.

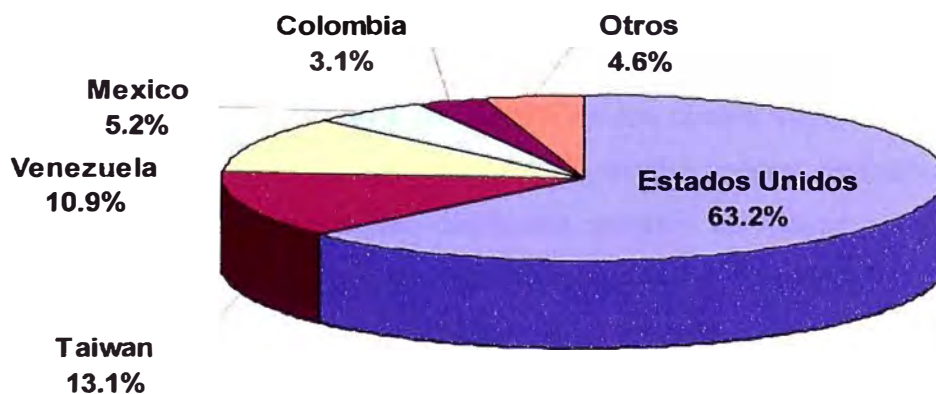
**FIGURA N° 1.1**  
**ORIGEN DE PAISES DE IMPORTACION DE PREFORMA PET**



Fuente: Agencia de Aduanas (2009).

En <http://www.aduanet.gob.pe/operatividadAduana/index.html>

**FIGURA N° 1.2**  
**PAISES DONDE SE IMPORTA LA RESINA PET**



Fuente: Agencia de Aduanas (2009).

En <http://www.aduanet.gob.pe/operatividadAduana/index.html>

La resina PET puede obtenerse a partir de dos formas: transesterificación de ácido tereftálico y etilenglicol y transesterificación de dimetiltereftalato y etilenglicol. Dependiendo de su forma de



producción y el grado de purificación del producto final, existen diversas calidades de resina. El PET con menor grado de contaminación de otras partículas, es decir más puro, se considera de mejor calidad, y por lo tanto de un precio más elevado. En general, el mercado de Estados Unidos y el de Europa son los que adquieren el PET con mayor calidad, mientras que Asia y América Latina lo adquieren de menor calidad.

La calidad final del PET depende en gran parte de la calidad de su monómero y dado que no es práctico purificar el monómero de tereftalato, la pureza química de su inmediato precursor es de gran importancia. En este contexto, el etilenglicol no presenta problema, pero el ácido tereftálico, al ser un sólido, limita la elección de la tecnología de purificación.

No obstante, una vez resuelto este problema, ya que el ácido tereftálico de gran pureza se convierte en un producto comercial, la necesidad inicial de utilizar dimetiltereftalato puede evitarse, por lo que las fases del proceso quedan simplificadas.

De lo anteriormente descrito, se infiere que la calidad y pureza de la resina PET depende de la calidad del monómero obtenido, del proceso de purificación de la resina y de los aditivos agregados durante su producción. Teniendo en cuenta la diversidad de resinas PET que circulan por el país, se observa que la calidad y pureza de las mismas no es homogénea, pues todos los países de los cuales importamos no usan el mismo proceso de separación, ni la misma calidad de materias primas; además, debido al uso destinado, poseen en mayor o menor grado diferentes aditivos que diversifican aún más las características del PET residual presente en los residuos sólidos del país.

En la actualidad, la principal técnica de reciclaje del PET en el Perú es el reciclaje mecánico, pero su principal problema es que el PET pierde algunas de sus propiedades y no se puede volver a emplear en la fabricación de nuevos envases para alimentos (siendo éste su principal uso) por razones sanitarias, y debe usarse para otro tipo de aplicaciones.

Actualmente, en el mundo se están desarrollando tecnologías, a escala industrial, para el reciclado químico que consiste en la separación de los

componentes básicos de la resina y la síntesis de nueva materia virgen, lo cual permite ampliar la gama de materiales a reciclar y el sustancial ahorro de gas y petróleo, que son las materias primas básicas del PET. El reciclaje químico del PET es un proceso que se lleva a cabo mediante distintas reacciones para la depolimerización, cada una encierra un proceso diferente, entre las cuales se encuentran la metanólisis, la glicólisis, la hidrólisis, la saponificación y la pirólisis, siendo las tres primeras las más utilizadas en la industria por la pureza de sus productos.

Básicamente, en los primeros dos, tras procesos mecánicos de limpieza y lavado, el PET se deshace o depolimeriza; se separan las moléculas que lo componen para, posteriormente, ser empleadas de nuevo en la fabricación de PET.

Otro sistema de reciclado químico, utilizado en escalas relativamente pequeñas, en pequeños reactores, es la esterificación para componer resinas insaturadas utilizadas para fabricar láminas plásticas moldeadas en frío como las destinadas a techos, recubrimientos de guardabarros de automóviles y una infinidad de productos.

En comparación, el reciclado mecánico es menos costoso, pero obtiene un producto final de menor calidad para un mercado más reducido con un mayor volumen de rechazos. Con este método se obtiene PET puro incoloro destinado a bebidas refrescantes, agua, aceites y vinagres, PET verde puro para bebidas refrescantes y agua, mientras que el PET multicapa con barrera de color destinado a cervezas, zumos, etc. así como el PET puro de colores intensos, opacos y negros se obtienen del reciclado químico. Otro tipo, el PET puro azul ligero, empleado como envase de aguas, se obtiene a partir de los dos sistemas.

En diversos países se ha venido aplicando el reciclaje del PET por medios químicos logrando buenos resultados y, lo más importante, produciendo un material con las mismas propiedades del original, permitiendo así su uso en la industria de los alimentos y logrando también la pureza de sus componentes esenciales, a tal grado que se pueden comercializar como compuestos puros.

La depolimerización es la parte fundamental del proceso de reciclaje químico, el cual es completado cuando se produce, ya sea nuevamente el PET como materia prima u otros compuestos con aplicaciones industriales, como resinas poliméricas.

De los tres procesos antes mencionados, el proceso de glicólisis es el favorito para ser implementado a escala industrial, debido principalmente a que el proceso no requiere temperaturas ni presiones elevadas que encarecerían los equipos necesarios, y porque el proceso en sí, es el más sencillo de los tres.

Existen diversos trabajos que han determinado las condiciones óptimas de operación para la glicólisis en fase líquida de los residuos plásticos europeos y asiáticos, empleando diferentes solventes y catalizadores. Los trabajos en este tema en América Latina son muy escasos y generalmente tratan el tema de reciclaje químico vía metanólisis o hidrólisis, relegando el reciclaje químico por glicólisis.

Las investigaciones acerca de glicólisis en fase líquida de PET residual se han llevado a cabo a temperaturas en el rango de 190°C – 250°C, dependiendo la temperatura del grado de contaminación de la materia prima, es decir de la calidad del PET; a diferentes tiempos de reacción, en diferentes solventes (etilenglicol, propilenglicol y mezclas de éstos) y con diversos catalizadores (acetato de zinc, plomo, manganeso y cobalto); eligiendo las condiciones, solvente y catalizador del proceso de acuerdo a la calidad del PET a procesar. En todas las investigaciones, se comprueba que los principales parámetros de rendimiento de la reacción son las concentraciones del solvente y catalizador en la mezcla a reaccionar. Los valores adecuados de estas concentraciones, que conllevan a un mayor rendimiento de la reacción, establecen las condiciones óptimas de reacción del sistema; es decir, determinar las condiciones óptimas de reacción de la glicólisis del PETW significa establecer las concentraciones de solvente y catalizador en las que un aumento de la concentración del solvente y/o catalizador no tienen un impacto significativo en el rendimiento de la reacción (Goje, Thakur, Chuahan y Patil, 2005)

En nuestro país, las investigaciones en cuanto al reciclaje químico de residuos plásticos se refiere son prácticamente nulas; no existiendo por lo tanto una base de datos referida a las condiciones óptimas de los procesos de depolimerización química de los residuos plásticos presentes en los residuos sólidos urbanos.

## **1.2 Antecedentes de la Investigación**

De los estudios de investigación de glicólisis del PET, la mayoría es llevada a cabo en reactores batch. Hay dos sistemas bien definidos; los que emplean temperaturas por debajo del punto de fusión del PET y/o por debajo del punto de ebullición del solvente, o glicólisis de solución (solvente en fase líquida), y los que investigan la glicólisis del PET fundido, o glicólisis de fusión.

La glicólisis de solución es llevada a cabo en un rango de temperaturas de 190°C – 245°C. En estos sistemas, las escamas de PET son suspendidas en un medio de etilenglicol puro o mezclado con otro solvente, creando un sistema de reacción de dos fases (aunque hay estudios que muestran que con la adición de un catalizador es posible lograr un sistema homogéneo). Una vez que la reacción logra una alta conversión, los oligómeros con bajo peso molecular son solubles en el etilenglicol caliente. Los tiempos de reacción típicos en estos sistemas varían de 60 – 90 minutos o más para lograr conversiones más altas (Patterson, 2007).

### **1.2.1 Glicólisis Batch**

Los estudios en glicólisis de solución datan desde la década de 1980, aunque existen patentes que se ocupan de este tipo de glicólisis que datan de la década de 1970. Desde 1987 – 1989, Vaidya y Nadkarni publicaron algunos trabajos relacionados con la síntesis de polioles poliéster desde PET residual. Para obtener materiales de partida que conduzcan a la síntesis, la primera depolimerización de PET residual se realizó con propilenglicol y etilenglicol. En estos estudios, la reacción de glicólisis se llevó a cabo a 200°C durante 8 horas usando un exceso de PEG/EG

(hasta 62.5:37.5 EG:PET en peso) en presencia de acetato de zinc como catalizador. Fueron capaces de lograr casi una depolimerización completa a monómero BHET bajo estas condiciones. En 1989, Baliga y Wong publicaron un estudio sobre glicólisis de escamas de botellas de PET post-consumo. Observaron que el equilibrio entre el monómero BHET y las demás oligómeros presentes fue alcanzado después que se permitiera al sistema reaccionar durante 8 horas a 190°C con un exceso de EG, también en presencia de un acetato metálico como catalizador. En el equilibrio, encontraron que sólo el 25% del EG inicial fue consumido desde una relación inicial en peso de EG:PET de 43.8:56.2. Las pruebas con acetato de zinc, plomo, manganeso y cobalto llevaron a la conclusión que el tipo de catalizador afectó la tasa inicial de reacción, pero no el equilibrio final logrado. Al experimentar la glicólisis con escamas de botellas coloreadas, no observaron diferencia en el rendimiento de depolimerización cuando fue comparada con las escamas de botellas transparentes.

En la década de 1990, muchos estudios emplearon los reactores batch en el mismo rango de temperatura descrito. Los investigadores pudieron llegar a tiempos de reacción desde 8 horas a 2-3 horas para un mismo porcentaje de conversión (Patterson, 2007). Chen (1991) encontró que sin catalizador en el sistema, las escamas de PET todavía permanecen en el sistema aún después de 10 horas. Con la adición de catalizador, sin embargo, las hojuelas de PET desaparecen después de 2 horas y la mezcla de reacción forma una sólo fase.

Ha habido un gran aumento en el número de los estudios de glicólisis desde el año 2000. En general, dichos trabajos esperan encontrar las condiciones óptimas bajo las cuales ocurre la reacción, investigando diferentes variables como la temperatura, tiempo de reacción, tamaño de partícula y catalizador de reacción. Chen (2003) estudió la glicólisis de PET post-consumo de envases de bebidas a 190°C y encontró que las condiciones

óptimas de reacción para producir principalmente monómero de BHET y dímeros fue de un tiempo de reacción de 1.5 horas usando acetato de manganeso como catalizador. Xi (2005) estudió la glicólisis de envases de PET residual a 196°C. De acuerdo a este trabajo, se obtuvo 85.6% de rendimiento de BHET, siendo condición óptima de operación un tiempo de reacción de 3 horas en presencia de acetato de zinc como catalizador. Goje y Mishra (2003) investigaron la glicólisis de escamas de PET a 197°C y hallaron un tiempo óptimo de reacción de 90 minutos para lograr un 99% de conversión de PET, usando acetato de zinc como catalizador.

Otro grupo de investigadores estudió el efecto de emplear catalizadores no tradicionales en el sistema de reacción. Shukla (2002) encontraron que los rendimientos cualitativos y cuantitativos del monómero BHET usando catalizadores alcalinos para la reacción de glicólisis fue equivalente a los obtenidos usando catalizadores convencionales de acetato de zinc y acetato de plomo, de los cuales se sabe tienen efectos perjudiciales para el medio ambiente. Troev (2003) reemplazó el tradicional acetato de zinc con el novedoso fosfato de titanio (IV) como catalizador. Observaron mejora en el ratio de reacción usando este catalizador cuando se depolimerizaba el PET grado fibra ( $M_w = 30000$ ), pero no había distinción notable en la depolimerización de PET grado botella ( $M_w = 51000$ ).

Por otro lado, otros investigadores realizaron la glicólisis del PET para usar los productos de reacción en otras aplicaciones. Grzebieniak (2004), recuperó oligómeros para usarlos en la síntesis de co-poliésteres de tereftalato de etileno y ácido láctico – L.

Una interesante característica de la publicación de Goje y Mishra (2003) es que trata diferentes efectos en la transferencia de masa en el sistema estudiando la influencia del tamaño de partícula en la velocidad de reacción de la glicólisis. El polvo de PET residual fue usado con un tamaño de partícula en un rango

de 50 a 512 $\mu$ m. Con tamaños de partícula más pequeños que 150 $\mu$ m, no hubo un efecto considerable en la velocidad de reacción de la glicólisis ni en la constante de reacción. Más allá de 150 $\mu$ m, las velocidades cayeron de manera importante con el incremento del tamaño de partícula. Estos resultados indican que la difusión en los pellets es importante y puede limitar la reacción para los tamaños grandes de partícula.

Ertas (2005) estudió la depolimerización de hojuelas de PET residual en presencia de acetato de zinc como catalizador y etilenglicol como solvente. Los productos de la reacción de glicólisis obtenidos usando relaciones molares de PET:EG iguales a 1:1, 1:2, 1:4 y 1:6 fueron extraídos tres veces con vapor de agua, llamando a la fracción sólida Fracción Insoluble en Agua (WIF). El filtrado fue enfriado hasta 4°C y a los sólidos cristalizados obtenidos por filtración los llamó Fracción Cristalizable Soluble en Agua (WSCF). Todos los productos reaccionaron con anhídrido tálico (PA), pentaeritritol (PE) y ácido fático (FA) (valorización de yodo 155, valorización ácida 195) para obtener resinas alquídicas; las reacciones fueron seguidas de una valorización ácida. Las propiedades físicas y químicas como el tiempo de secado, dureza, resistencia a la abrasión, resistencia al agua, resistencia a los álcalis y resistencia a la degradación oxidativa térmica (con análisis termogravimétrico, TGA) de estas resinas también fueron estudiadas. Las resinas de PET residual fueron comparadas con las resinas de referencia preparadas con PA, PE, FA y EG. Las propiedades de las resinas basadas en PET residual mostraron ser compatibles con las propiedades de las resinas referenciales.

En el estudio realizado por Abu Bakar (2006) acerca del reciclaje por depolimerización química por glicólisis de residuos tipo PET proveniente de envases de bebidas, se caracterizó e identificó los productos por los métodos convencionales de valor de acidez y número de hidróxilo y las técnicas de Escaneo Diferencial Calorimétrico (DSC) y Transformada de Fourier Infra Rojo

(FTIR). Se encontró que los productos de glicólisis consisten principalmente en BHET y sus dímeros. Los productos de la glicólisis fueron poliesterificados con anhídrido maleico y luego sus cadenas enlazadas con estireno para producir una formulación para la resina de PET. El espectro FTIR también reveló el proceso de unión entre las cadenas del poliéster y el monómero estireno, resultando un producto final con alta densidad debido a la cadena de enlaces que forman la red polimérica. El curado de la resina le confirió estabilidad térmica al producto final.

Vitkauskienė (2008) realizó pruebas de reciclaje de residuos PET industriales por glicólisis usando EG para obtener BHET y DEG en ausencia o presencia de glicerol y ácido atípico para obtener polioles poliésteres aromáticos (APP). Un alto rendimiento (cerca al 82%) de alta calidad de BHET fue obtenido luego de 3 horas de reflujo a 190°C. Los APPs producto tenían número de hidróxilo en un rango de 290 a 430 mg KOH/g y la viscosidad en un rango de 3000 a 38000 mPa.s. Los APPs sintetizados en presencia de aditivos funcionales fueron amorfos, más viscosos y mucho más estables frente a la cristalización. El efecto de la cantidad y tipo de catalizadores organometálicos en las propiedades de los APPs también fue investigada.

### **1.2.2 Glicólisis Continua**

La literatura patente muestra algunos procesos de glicólisis continua de PET. Los primeros trabajos fueron hechos por Ostrowski en 1975. Ostrowski presentó un proceso de depolimerización de PET en oligómeros de bajo peso molecular en reactor continuo de tanque agitado (CSTR). En este sistema, reportó un tiempo de residencia de 1.5 – 2 horas a 230°C, obteniendo oligómeros de BHET con un grado de depolimerización de 50 – 75%. Malik (1978) siguió su trabajo con una patente incluyendo un proceso de glicólisis operado a temperaturas entre 225°C – 235°C. Mientras afirman que el



proceso es operado continuamente, describen los tiempos muertos (donde un tiempo muerto es definido como el lapso de tiempo desde que el EG es agregado en el reactor hasta el momento en que termina la glicólisis) de 4 a 15 horas. Finalmente, en 2 patentes separadas, Ekart presenta un proceso continuo para glicólisis en un reactor agitado. Este proceso opera a 180°C – 240°C (1997) para tiempos de reacción mayores a 4 horas (2002) para producir una “material oligomérico” que es llevado corriente abajo del proceso para la separación de impurezas.

En base a la problemática descrita, se formula el problema de éste trabajo de investigación.

### **1.3 Formulación del Problema**

#### **1.3.1 Problema General**

- No se conoce el efecto de la variación de la concentración del solvente y catalizador en la depolimerización por glicólisis en fase líquida del polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima, para la obtención de bis(hidroxietil) tereftalato como producto en unas condiciones aptas para su directa repolimerización en resina de polietilén tereftalato.

#### **1.3.2 Problemas Específicos**

- No se conoce la concentración óptima del etilenglicol como solvente en la depolimerización por glicólisis en fase líquida del polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima.
- No se conoce la concentración óptima del acetato de zinc como catalizador en la depolimerización por glicólisis en fase líquida del polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima.

#### **1.4 Justificación de la Tesis**

El control ambiental sobre los diferentes productos industriales es un tema que gana día a día protagonismo en el mundo y es necesario desarrollar medios en los cuales se pueda dar el respectivo tratamiento a estos productos para que al final de su ciclo de vida no se conviertan en un problema para el medio ambiente.

La materia prima del PET está constituida por derivados del petróleo, siendo éste un recurso no renovable, el recuperar los materiales con los que se produce una determinada cantidad de PET genera un ciclo de producción, utilización y producción, evitando así el gasto de más materia prima y por lo tanto conservando los recursos del planeta.

El reciclaje de plásticos PET se viene realizando principalmente a través de medios mecánicos, los cuales consisten en transformar la materia prima reciclable en productos de menor importancia económica, con limitaciones establecidas, principalmente en su utilización en empaques para alimentos. Otro medio para reciclar el polímero es el químico, el cual permite obtener las materias primas constitutivas del PET o productos intermedios que no tendrían las restricciones anteriores, pudiéndose utilizar para producir nuevamente PET u otros productos.

Por ésta razón, se debe buscar la forma de realizar un proceso de reciclaje que tenga como resultado un material con características tales que pueda ser utilizado como el polímero virgen y, la respuesta en éste caso, puede ser el reciclaje químico, que consiste en dar reversa a la reacción que dio lugar a la producción del polímero, para que al final del proceso se obtengan los compuestos originales y así volverlos a polimerizar o distribuirlos como materia prima para otras industrias; siendo la depolimerización vía glicólisis en fase líquida (glicólisis de solución), la principal opción para reciclar químicamente los residuos plásticos tipo PET presentes en los residuos sólidos urbanos.

Las investigaciones de los últimos años, señalan que el proceso tiene mejores resultados cuando se trabaja etilenglicol y acetato de zinc como solvente y catalizador, respectivamente. Aunque, estos mismos trabajos muestran que las concentraciones de estos en el sistema reaccionante depende de la calidad del PET a reciclar, y en nuestro caso, variables

desconocidas debido a la diversidad de calidad y pureza de las resinas PET importadas.

La elección de la glicólisis como técnica de reciclaje químico por depolimerización, se debe a las siguientes características:

Los servicios auxiliares necesarios para cada proceso difieren entre sí. Mientras que la glicólisis sólo precisa de aceite térmico y agua de refrigeración como fluidos de transferencia energética, la hidrólisis precisa también de vapor y la metanólisis necesita de los tres fluidos citados, además de refrigerante para su sistema de cristalización de DMT.

La hidrólisis es el proceso con unas necesidades mayores de servicios auxiliares de aceite térmico y agua de enfriamiento, mientras que la metanólisis es el proceso con más necesidades de vapor de agua.

En cuanto a consumo de energía eléctrica, el proceso de hidrólisis es el que presenta un mayor consumo, puesto que los reactores, que son los mayores consumidores de energía eléctrica mediante su sistema de agitación en los diferentes procesos, son los más grandes.

Respecto a la separación de productos y exceso de reactivo de PET no despolimerizado, en todos los casos se realiza mediante filtración y cuando el PET no despolimerizado ha sido separado, los productos y el exceso de reactivo se separan entre sí mediante destilación, en el caso de la glicólisis ya que la separación es bicomponente, y mediante cristalización y destilación en el caso de los procesos de metanólisis e hidrólisis, ya que presentan tres componentes a separar.

En el aspecto económico, la instalación y puesta en marcha de los diferentes procesos no genera el mismo beneficio con los precios estimados para los productos obtenidos. Además, los costes de instalación son significativamente mayores para los procesos de metanólisis e hidrólisis, en comparación al de glicólisis.

Las concentraciones del solvente y catalizador, dependen de la calidad y pureza del PET a reciclar, de allí que estas relaciones no sean las

mismas en todas las latitudes. Sin embargo, las condiciones de presión, temperatura, velocidad de agitación y tiempo de reacción son variables que, con la elección adecuada de tipo y concentración de solvente y catalizador, son prácticamente las mismas independientemente de las características de la materia prima (López, 2006, p. 164).

En base a las investigaciones antecedentes se elige el solvente y catalizador (etilenglicol y acetato de zinc respectivamente), a estudiar en el proceso de reciclaje químico vía depolimerización por glicólisis de PETW, siendo las concentraciones de los mismos las variables a determinar. Mientras que las demás condiciones de operación (temperatura, tiempo de reacción, velocidad de agitación y presión) son las mismas que las estudiadas y determinadas en anteriores trabajos de investigación.

## **1.5 Objetivos de la Tesis**

De acuerdo a los problemas planteados, se tienen los siguientes objetivos para este trabajo de investigación.

### **1.5.1 Objetivo General**

Determinar el efecto de la variación de la concentración del solvente y catalizador en la depolimerización por glicólisis en fase líquida de polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima, para la obtención de bis(hidroxiethyl) tereftalato como producto en unas condiciones aptas para su directa repolimerización en resina de polietilén tereftalato.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Determinar la concentración óptima del etilenglicol como solvente en la depolimerización por glicólisis en fase líquida de polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima.

- Determinar la concentración óptima del acetato de zinc como catalizador en la depolimerización por glicólisis en fase líquida de polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima.

## **1.6 Hipótesis de la Tesis**

Basado en lo anteriormente descrito, se plantean las siguientes hipótesis de este trabajo de investigación.

### **1.6.1 Hipótesis General**

La variación de la concentración del solvente y catalizador respectivamente, influyen en la eficiencia de la depolimerización por glicólisis en fase líquida de polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima, para la obtención de bis(hidroxiethyl) tereftalato como producto en unas condiciones aptas para su directa repolimerización en resina de polietilén tereftalato.

### **1.6.2 Hipótesis Específicas**

- Existe una concentración óptima del etilenglicol como solvente en la depolimerización por glicólisis en fase líquida de polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima.
- Existe una concentración óptima del acetato de zinc como catalizador en la depolimerización por glicólisis en fase líquida de polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima.

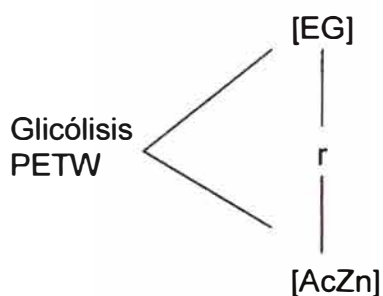
## **1.7 Diseño Metodológico**

### **1.7.1 Tipo de estudio**

La investigación es de tipo experimental, debido a que el estudio está basado en la observación, registro y análisis de datos recolectados en laboratorio para su posterior interpretación,

describiendo como se comportan las variables analizadas en la reacción de depolimerización química por glicólisis en fase líquida; y correlacional, ya que se quiere medir la intensidad de la asociación entre las variables estudiadas con la obtención de producto en unas condiciones aptas para su directa repolimerización, para las características propias de los residuos plásticos tipo PET de la ciudad de Lima.

**FIGURA N° 1.1**  
**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**



Elaboración propia

Donde:

[EG] = Concentración del solvente, etilenglicol

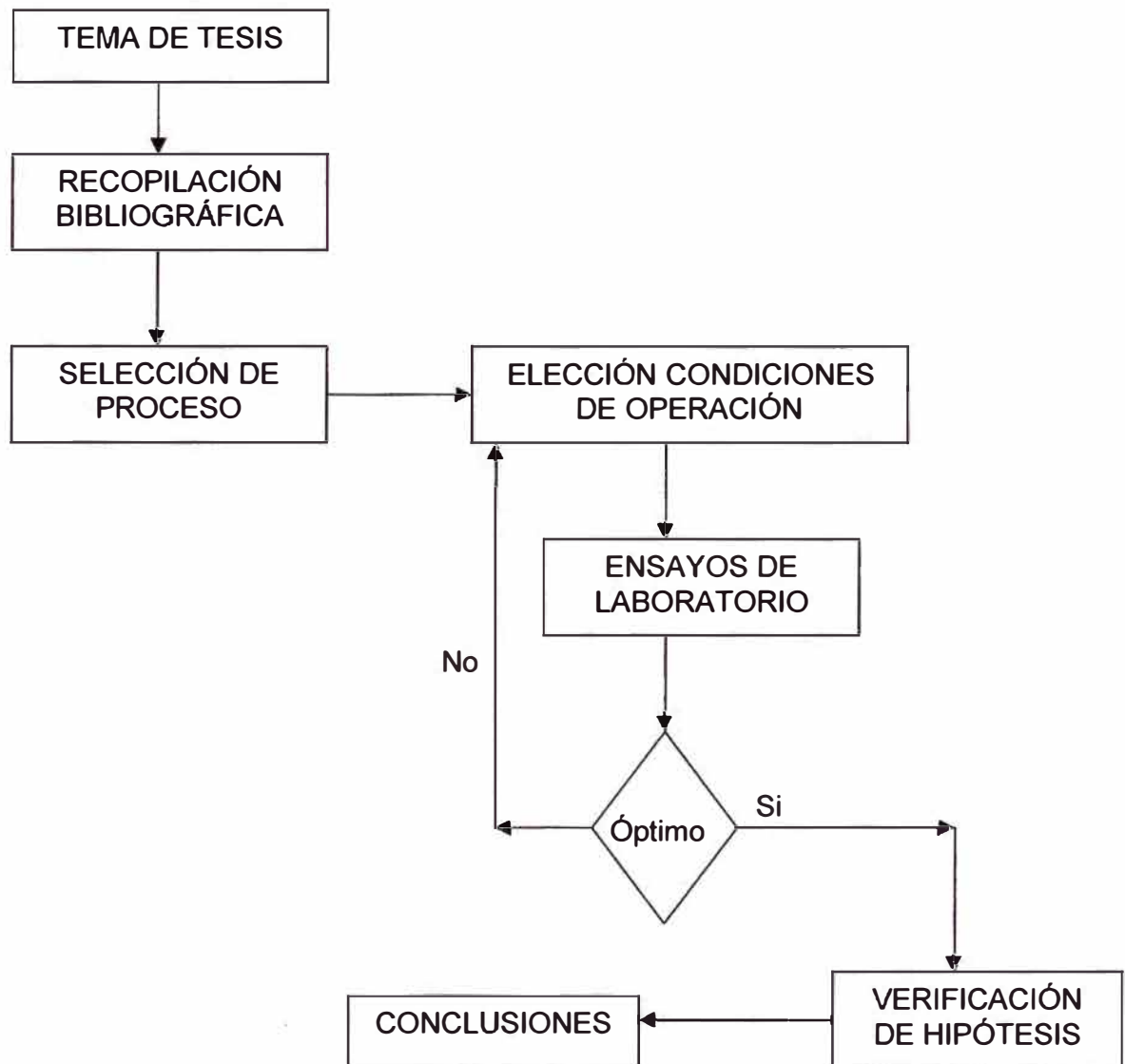
[AcZn] = Concentración de catalizador, acetato de zinc

r = Nivel de relación

### 1.7.2 Metodología de investigación

La metodología de investigación se aprecia en la figura N° 1.2.

**FIGURA N° 1.2**  
**DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**



Elaboración propia

**a. Recopilación bibliográfica**

La recopilación bibliográfica abarcó tanto fuentes primarias como secundarias referentes a la problemática del impacto ambiental de los plásticos tipo PET presentes en los residuos sólidos urbanos y las técnicas de tratamiento de estos residuos, especialmente la depolimerización química. Así

mismo, se revisó información referida a la situación actual de la industria de plásticos en el Perú, tendencias y perspectivas, para determinar la viabilidad técnica y económica de la construcción de una planta industrial de depolimerización química de PETW para obtener resina de PET comercial.

**b. Selección de proceso**

Se utilizó la recopilación bibliográfica con énfasis en el reciclaje químico, haciendo un análisis detallado de los diferentes procesos que hay en la actualidad, y de esta forma seleccionar el proceso más adecuado para realizar a escala laboratorio, teniendo en cuenta aspectos de viabilidad técnica. El proceso seleccionado fue la depolimerización vía glicólisis en fase líquida, debido a que esta técnica es la que presenta, menores costos de producción a nivel industrial, menor consumo de energía y se obtiene el monómero BHET listo para su directa repolimerización para obtener nuevamente resina PET.

**c. Selección de muestra**

El tema estudiado en este trabajo es una de las variantes del reciclaje químico de residuos plásticos tipo PET. En nuestro país, la principal fuente de residuos de este plástico son los envases de bebidas gaseosas, agua de mesa o mineral y aceite de cocina. De allí que la unidad de análisis sean justamente estos residuos plásticos presentes en los residuos sólidos urbanos. En el 2008, los RSU generados en la ciudad de Lima ascendieron a 2'504,234 toneladas (Ver anexo A3.1).

Los Residuos Sólidos Urbanos de la ciudad de Lima contienen aproximadamente 25% de material reciclable (papel, cartón, plástico, metales, textiles, madera), de los cuales, alrededor del 20% son residuos plásticos y el 16% de



éstos son residuos plásticos tipo PET (PRODUCE, 2008), constituyendo entonces la principal fuente de obtención de PETW.

Debido a que la generación de residuos sólidos, y por lo tanto la generación de PETW, está ligada principalmente al número de habitantes, los distritos de la capital se han subdividido en dos grupos de acuerdo a su generación per cápita de residuos sólidos: Grupo A, cuya generación está por encima del total de Lima Provincia; y Grupo B, cuya generación está por debajo de este valor (Ver anexo N° 3). La selección de PETW en los distritos de Lima es de tipo probabilística, porque el residuo PET tiene la misma posibilidad de ser recogido y por unidades muestrales, siendo éstos los grupos A y B mencionados.

**CUADRO N° 1.1**  
**SELECCIÓN DE MUESTRA**

<b>Unidad de Análisis</b>	<b>Unidad Muestral<sup>(*)</sup></b>	<b>N° Distritos</b>	
PETW	Grupo A	gpc < 0.82	26
	Grupo B	gpc > 0.82	17

(\*) gpc : Generación Per Cápita (kg/hab/día)

Fuente: Sistema Nacional de Información Ambiental. 2009. "Residuos sólidos generados según distrito de la provincia de Lima, 2007". p.319

Elaboración propia

Debido a que las posibilidades de encontrar residuos plásticos en los distritos de Lima, es muy alta (Ver anexo N° 3), se considera una probabilidad a favor del 98%. Para el cálculo del tamaño de la unidad muestral se considera una certeza del 95% (error 5%).

### Cálculo de las unidades muestrales

El tamaño de la muestra sin ajustar se calcula a partir de (Hernández, 1998):

$$n^* = \frac{S^2}{V^2} \quad \dots(\text{Ec. 1.1})$$

Donde,

$S^2$  = varianza de la muestra expresada como probabilidad de ocurrencia de la variable =  $p^*(1-p) = 0.98*(1-0.98) = 0.0196$

$V^2$  = varianza de la población =  $(0.05^2) = 0.0025$

Reemplazando,

$$n^* = 8$$

Como se conoce el tamaño de la población, se corrige el tamaño de la muestra:

$$n = \frac{n^*}{1 + \frac{n^*}{N}} = \frac{8}{1 + \frac{8}{43}} = 7 \quad \dots (\text{Ec. 1.2})$$

Calculando la fracción constante para obtener el tamaño de muestra (número de distritos) de cada unidad muestral:

$$k = \frac{n}{N} = \frac{7}{43} = 0.1542 \quad \dots (\text{Ec. 1.3})$$

Con lo que el número de distritos en donde se debe recolectar PETW de cada grupo es:

$$\text{Grupo A} = 0.1542 * 26 = 4 \text{ distritos}$$

$$\text{Grupo B} = 0.1542 * 17 = 3 \text{ distritos}$$

La selección de los distritos por unidad muestral es de tipo aleatoria, para asegurarnos que cada unidad de análisis (PETW) tenga la misma posibilidad de ser elegido.

Los distritos seleccionados son:

- Grupo A: Villa El Salvador  
Los Olivos  
San Miguel  
Comas
- Grupo B: San Martín de Porres  
Santiago de Surco  
Miraflores

**CUADRO N° 1.2**  
**DISTRITOS SELECCIONADOS**

<b>Distrito</b>	<b>gpc<sup>(*)</sup></b>	<b>TM RSU</b>	<b>TM PET</b>
Villa El Salvador	0.45	378'470	3'028
Los Olivos	0.70	318'140	2'545
San Miguel	0.70	129'107	1'033
Comas	0.80	486'977	3'896
San Martín de Porres	0.90	579'561	4'636
Santiago de Surco	0.97	289'597	2'317
Miraflores	1.11	85'065	681
		<b>TOTAL</b>	<b>18'135</b>

(\*) gpc : Generación Per Cápita (kg/hab/día)

Fuente: Sistema Nacional de Información Ambiental, 2009.  
"Residuos sólidos generados según distrito de la provincia de Lima, 2007". p.319

Elaboración propia

La cantidad de muestra recogida en cada distrito fue proporcional a la cantidad de residuos generados. Se tomó como base una recolección de 5kg de PETW, siendo la composición por distrito:

**CUADRO N° 1.3**  
**COMPOSICIÓN DE MUESTRA**

<b>Distrito</b>	<b>TM PET</b>	<b>%</b>	<b>Muestra (kg)</b>
Villa El Salvador	3'028	16.7	0.8
Los Olivos	2'545	14.0	0.7
San Miguel	1'033	5.7	0.3
Comas	3'896	21.5	1.1
San Martín de Porres	4'636	25.6	1.3
Santiago de Surco	2'317	12.8	0.6
Miraflores	681	3.8	0.2
<b>TOTAL</b>	<b>18'135</b>	<b>100.0</b>	<b>5.0</b>

Elaboración propia

La muestra fue tomada directamente en puntos de acopio municipales y de los residuos plásticos existentes en las calles, en mercados y en tiendas de abarrotes de los distritos de Lima seleccionados; el muestreo se realizó entre los días 28 de enero y 19 de febrero del 2009 entre las 11:00 y 16:00 horas. Para el trabajo de campo, se contrató personal de apoyo capacitado que seleccionó y recogió manualmente los distintos tipos de residuos plásticos tipo PET. Una vez recogido el material, se corroboró que se trataran de plásticos PETW. La muestra recogida está compuesta en un 63% de botellas de bebidas gaseosas, 24% de botellas de agua mineral y no mineral y 13% de envases de aceite. De todo el material acumulado, se seleccionó proporcionalmente al uso del envase, el equivalente a 5 kg (de acuerdo al peso aproximado de cada envase) para ser acondicionado para la prueba; material que fue molido y lavado para quitar posibles restos de pegamento de las etiquetas, grasa y suciedad en general.

**FIGURA N° 1.3**  
**BOTELLAS PET RECOGIDAS EN TIENDAS DE ABARROTES**



Distrito: Los Olivos / Villa el Salvador  
Fecha: 30 de Enero / 11 de Febrero del 2009

**FIGURA N° 1.4**  
**CENTRO DE ACOPIO VISITADO DE LA MUNICIPALIDAD DE SANTIAGO DE SURCO**



Fecha: 5 de Febrero del 2009

**FIGURA N° 1.5**  
**MATERIAL RECOGIDO EN LAS CALLES**



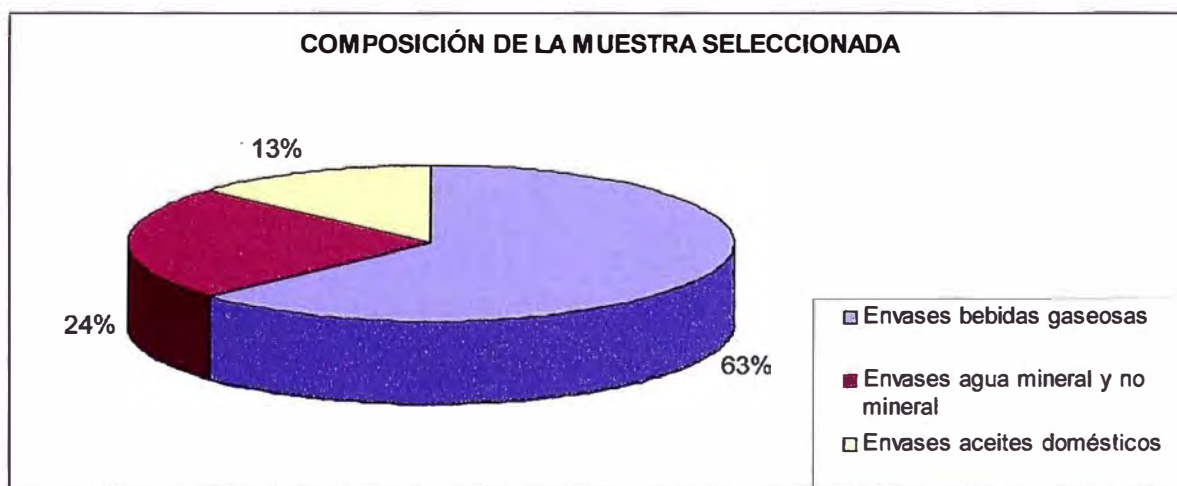
Distrito: San Miguel/ Comas

Fecha: 16 de Febrero / 19 de Febrero del 2009

La composición final de la muestra seleccionada para el tratamiento previo y posterior realización de ensayos es:

Envases de bebidas gaseosas	3150g	63%
Envases de agua mineral y no mineral	1200g	24%
Envases de aceites domésticos	650g	13%
<b>TOTAL</b>	<b>5kg</b>	<b>100%</b>

**FIGURA N° 1.6**



Elaboración propia

**d. Ensayos de la laboratorio**

La muestra seleccionada fue molida de manera manual para el análisis logrando una granulometría menor a  $150\mu\text{m}$  (pasante de malla 100). Este análisis granulométrico se realizó en las instalaciones del Laboratorio Central de Quimpac – Oquendo. La muestra obtenida fue lavada con detergente industrial y con soda cáustica, luego filtrada y secada antes de ser utilizada en los ensayos.

**FIGURA N° 1.7**

**BOTELLAS EN PROCESO DE MOLIENDA MANUAL**



La determinación de las propiedades de la materia prima se realizó en el Laboratorio N° 21 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil y en el Laboratorio Central de Quimpac – Oquendo. El análisis por espectroscopia IR se llevó a cabo en el Laboratorio de Espectroscopia de la Facultad de Ciencias de la UNI y el análisis de punto de fusión de los productos se realizó en el Laboratorio N° 12 de la Facultad de Ciencias. Los análisis de identificación de producto se encargaron como servicios externos a los laboratorios mencionados.

Los experimentos realizados se resumen a continuación:

- Determinación del peso molecular del PETW (materia prima)
- Análisis cualitativo de los productos obtenidos
- Efecto de la concentración del solvente etilenglicol.
- Efecto de la concentración del catalizador acetato de zinc.

Las principales pruebas, materia de este estudio, corresponden al estudio de la reacción propiamente dicha. Estas pruebas se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio Central de Quimpac y tienen por objetivo determinar el efecto de la variación de solvente y catalizador en la depolimerización por glicólisis en fase líquida de PETW, programando para ello 10 pruebas variando las concentraciones de uno y otro parámetro, de manera alterna, y de acuerdo a los resultados obtenidos. Además de realizar una prueba preliminar a las condiciones de referencia conocidas para establecer una línea base en cuanto a resultados y variación de las relaciones en peso del solvente y catalizador, se realizó una prueba final de verificación de resultados óptimos, sumando en total 12 las pruebas a realizar.

Las pruebas de glicólisis se realizaron en un agitador magnético con calentador eléctrico incorporado marca



CIMAREC. Este equipo tiene unas dimensiones de 7"x7" y puede desarrollar velocidades de agitación de hasta 1200rpm y una temperatura de 540°C. El manual de operación de este equipo se adjunta en el anexo N° 1.

**FIGURA N° 1.8**  
**AGITADOR MAGNÉTICO EMPLEADO PARA LAS PRUEBAS**



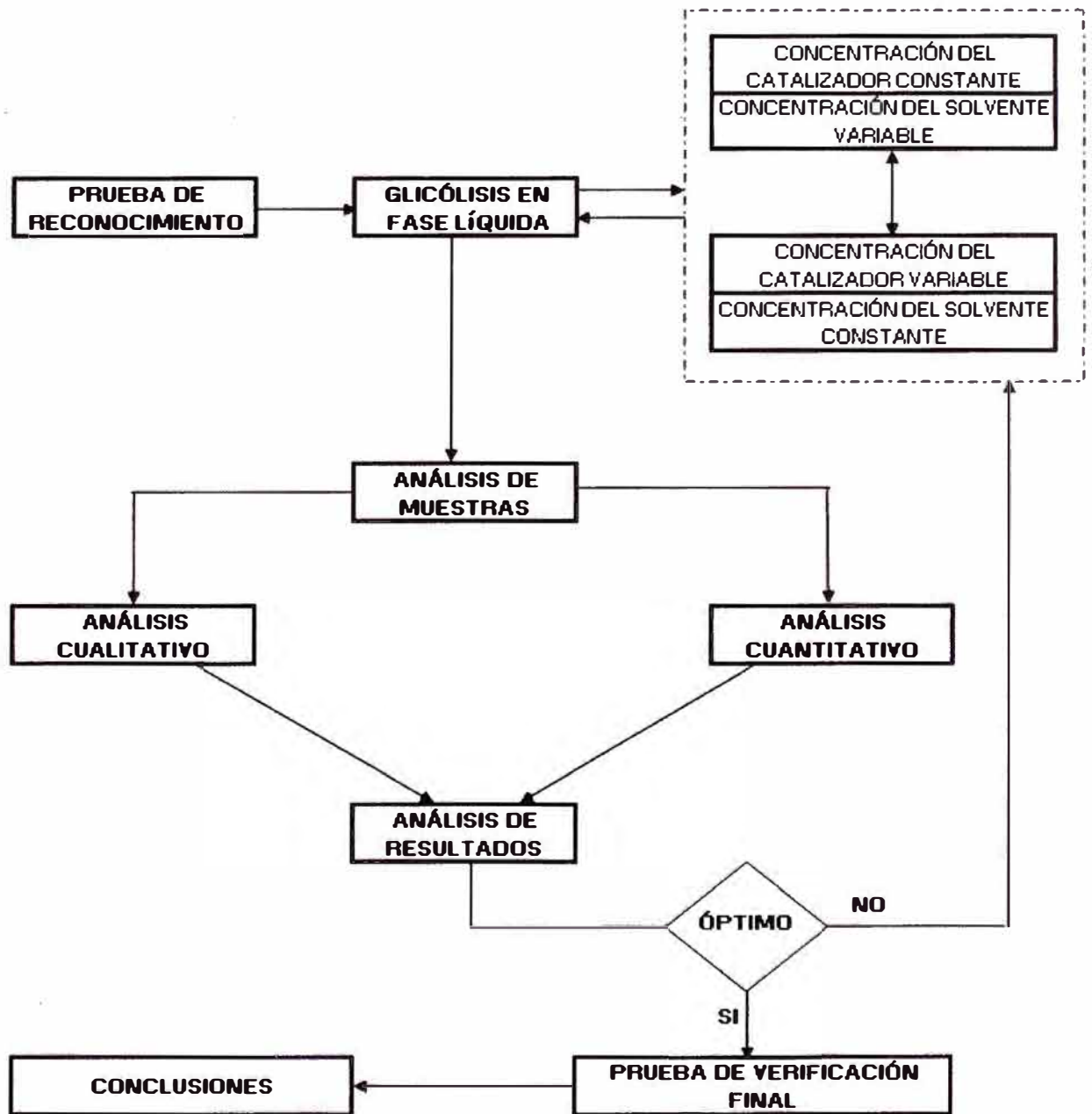
Este equipo tiene un indicador digital de temperatura y RPM además de un sistema de alarma de cubierta caliente que alerta al usuario si la superficie de la unidad se encuentra por encima de los 50° C, aún cuando el control de calor de la unidad se encuentre en posición OFF. También ofrece un rango de agitación que va de 50 a 1200rpm., con una agitación mejorada a baja velocidad, un control de velocidad constante y un acoplamiento magnético más fuerte. Con un rango de temperatura de 5 a 540 °C, el elemento de calentamiento de alto voltaje brinda ebullición más rápida y también una puesta en marcha más rápida.

**e. Retroalimentación**

Esta etapa se divide en dos fases: la primera es una recopilación de los datos de la etapa de experimentación, con los cuales se realizaron gráficas de la relación PET:EG y PET:AcZn vs BHET recuperado, luego se analizaron las gráficas para determinar cual era la mejor relación y volver a la etapa experimental utilizando esta relación y variando la concentración de solvente y catalizador en la mezcla. En la segunda fase se asociaron en una sola las gráficas de concentración de solvente y catalizador vs BHET recuperado, para luego ser analizada y determinar cual era la relación óptima de solvente y catalizador respecto al PET.

Finalmente, con estos parámetros se realizó un ensayo definitivo con las condiciones de proceso que se consideraron eran las más favorables para determinar la cinética de reacción. En la figura N° 1.9 se muestra el diseño experimental del proceso.

FIGURA Nº 1.9  
ESQUEMA DEL DISEÑO EXPERIMENTAL



Elaboración propia

## **CAPÍTULO II**

### **LA INDUSTRIA DE PLÁSTICOS EN EL PERÚ**

La industria de productos plásticos en el Perú se encarga de transformar en productos finales los productos de plástico elaborados por la industria petroquímica de otros países con base en la resina, la cual es un derivado del petróleo. De esta forma, dependiendo del grado de procesamiento de la resina, se obtienen diferentes tipos de plásticos. A su vez, del procesamiento de cada uno de estos últimos se obtienen los productos plásticos finales. Cabe destacar que cada tipo de plástico tiene usos específicos, es decir, sirve para elaborar productos plásticos que comparten propiedades químicas similares. Entre los principales derivados de la resina se encuentran los siguientes productos plásticos:

- Polietileno: el plástico más popular, utilizado para la fabricación de bolsas plásticas en general.
- Poliestireno: es un plástico más duro y también flexible.
- Polipropileno: utilizado en la elaboración de sacos para harina de pescado y geomembranas o mantas sintéticas.
- P.V.C.: empleado para la fabricación de tubos de construcción y geomembranas.
- Plastificantes D.O.P.
- Masterbatch
- Sulfato Tribásico de Plomo
- Resina PET para envases: envases plásticos principalmente para bebidas gaseosas.

Estos productos plásticos tienen una amplia diversidad de usos y aplicaciones, entre los cuales destacan, de acuerdo a los sectores demandantes:

- Industrias manufactureras: envolturas, empaquetado, envases PET, telas plásticas (usadas en la elaboración de prendas de vestir, calzado, carteras, carpas y toldos, entre otros).
- Industria pesquera: sacos de polipropileno para harina de pescado.

- Actividad minera: geomembranas.
- Sector agroindustrial: envases y envolturas, tuberías de PVC para proyectos de riego.
- Actividad comercial mayorista y minorista: bolsas y envolturas.
- Sector construcción: fabricación de tubos de PVC, pisos vinílicos, planchas fórmicas.

**CUADRO Nº 2.1**  
**PRINCIPALES PRODUCTOS Y SECTORES DEMANDANTES DE LA**  
**INDUSTRIA DE PLÁSTICOS**

<b>Forma primaria</b>	<b>Productos finales</b>	<b>Sectores demandantes</b>
Polietileno	Películas para uso agrícola	Agrícola
	Cables y alambres	Construcción, eléctrico y electrónico
	Juguetes y artículos deportivos	Industrias diversas
	Bolsas para productos de consumo	
	Botellas, tapas, cajones y baldes	
	Películas estirables e industriales	
	Fibras	Consumo masivo
	Películas para pañales e higiene personal	
	Superficies deportivas artificiales	
	Muebles para patios y otros ambientes	
Poliestireno	Juguetes	
	Carcasas de radio y televisión	
	Instrumental médico	
	Menaje doméstico	
	Botellas y tapones de botellas	
	Contenedores, equipajes	Consumo masivo
	Películas protectoras	
	Reflectores de luz	
Interiores de frigoríficos		
Embalajes alimentarios		

	Partes de la estructura del automóvil	Automotriz y servicios conexos
	Cubiertas de construcción	Construcción
	Envases industriales (Harina de pescado)	Pesca
	Geomembranas y mantas sintéticas	Minería
Polipropileno	Películas para alimentos, snacks, cigarrillos, golosinas e indumentaria	
	Bolsas tejidas (papas, cereales)	
	Hilos cabos, cordelería	
	Caños para agua caliente	
	Jeringas descartables	Consumo masivo
	Tapas en general, envases	
	Bazar y menaje	
	Baldes para pintura, helados	
	Fibras para tapicería, cubrecamas	
	Pañales descartables	
	Cajas de batería	
PVC	Perfiles para marcos, ventanas, puertas	
	Caños para desagües, mangueras	Construcción
	Tuberías para construcción	
	Pilas, juguetes, envolturas para golosinas	
	Envases: agua mineral, aceites, jugos	Consumo masivo
	Papel vinílico (decoración)	
	Catéteres, blisters, bolsas para sangre	
PET	Envases para gaseosas, aceites, agua mineral, cosméticos, entre otros	
	Envases al vacío, bolsas para horno	Consumo masivo
	Bandejas para microondas	
	Cintas de video y audio	
	Películas transparentes, radiográficas	
	Fibras textiles	Textil
	Geotextiles (pavimentación / caminos)	Construcción

Fuente: Córdova, Daniel (2004). "La industria de plásticos en el Perú. Departamento de Estudios Económicos, Banco Wiese Sudameris". Lima. p.3

### Sistema de codificación de envases plásticos

Este sistema, utilizado internacionalmente, ayuda a identificar en los envases, botellas, contenedores y recipientes en general, el tipo de material plástico usado para su fabricación. Ello facilita notablemente la selección, recuperación, y reciclaje de las diferentes resinas y compuestos plásticos, permite disminuir la cantidad de materiales que se incineran o se desechan en rellenos sanitarios y genera empleo a través de la industria de recuperación.

El símbolo universal del reciclaje se compone de tres flechas que forman un triángulo con un número en el centro y letras en la base, donde el número y las letras indican la resina usada.

FIGURA Nº 2.1

### SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE ENVASES Y EMPAQUES

SISTEMA DE IDENTIFICACION DE ENVASES Y EMPAQUES						
Tereftalato de Polietileno PET	Polietileno de alta densidad PEAD	Policloruro de vinilo PVC	Polietileno de baja densidad PEBD	Polipropileno PP	Poliestireno PS	Otros
						

Fuente: Guía Ambiental – Sector Plásticos. (2004). "Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo". Colombia, p.21

#### 2.1 Evolución, estructura e importancia del sector

En el Perú, dada la inexistencia de una industria petroquímica, la industria de productos plásticos se encarga de procesar los diferentes tipos de plásticos y transformarlos en productos finales. Las empresas del sector se dedican a la fabricación de uno o más tipos de productos plásticos, de modo que el grado de concentración industrial varía de acuerdo al mercado específico del producto plástico que se trate. Algunas empresas, tales como Peruplast y Amanco del Perú, tienen una elevada participación de mercado en sus respectivos rubros (productos plásticos con base en el polietileno y PVC, respectivamente), elevando los indicadores de concentración industrial en ellos (SNI, Agosto 2008).

### **2.1.1 Evolución del consumo y de la producción**

En los últimos años, la producción de productos plásticos ha mostrado un ritmo de crecimiento relativamente elevado, impulsado por la paulatina recuperación de la demanda interna y por el gradual aumento en el número de aplicaciones y usos del plástico en diferentes sectores económicos, destacando el caso de los envases PET para la industria de aceites comestibles y bebidas gaseosas, entre otros. De otro lado, también el crecimiento de los rubros de exportación no tradicional (Córdova, 2004), entre los cuales destacan el sector agroindustrial, el textil y la manufactura misma de productos plásticos destinados al consumidor final, han generado un incremento en la demanda por productos plásticos.

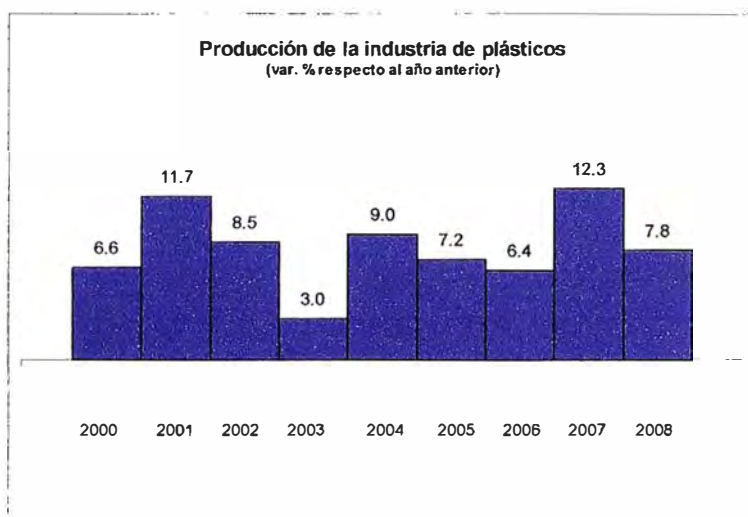
No obstante, el ritmo de expansión de la industria se desaceleró en el 2003, en el cual la producción del sector creció 3%, comportamiento que se viene revertiendo en los últimos años (en el 2008 experimentó un crecimiento de 7.8% respecto al año 2007). Dicha desaceleración estaría en parte explicada por la sustitución de productos plásticos de origen nacional por productos importados (las importaciones se incrementaron 12.5% en el 2003), así como por el contrabando y la producción informal. En este sentido, mientras que ciertos rubros muestran un importante dinamismo, tales como la producción de envases PET y de productos en base a polipropileno, otros rubros, tales como el de productos en base a poliestireno, se han contraído entre los años 2002 – 2006, para luego revertir el comportamiento en el 2007, mostrando así comportamientos diferentes al interior de la industria local de productos plásticos (SNI, Agosto 2008).

La industria de productos de plástico, contribuye con el 3.6% en el cálculo del PBI manufacturero y ha venido creciendo sostenidamente impulsada por el notable crecimiento de la demanda. Así, en el año 2007 la industria de plásticos mostró un notable dinamismo, creciendo 10.9% frente al año anterior,



reportando un monto de US\$ 228 millones en exportaciones y un PBI de S/. 1,960 millones (US\$ 627 millones). Este ritmo de crecimiento se mantuvo en el 2008, por lo que acumuló en el año una variación positiva de 7.8% (SNI, Agosto 2008).

**FIGURA Nº 2.3**



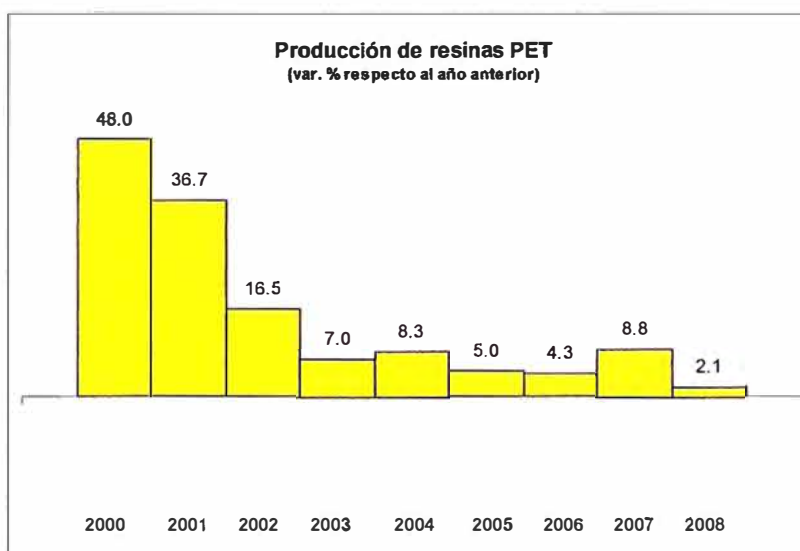
Fuente: Ministerio de la Producción – PRODUCE (2008). “Boletín estadístico mensual 2000 – 2008”. Dirección General de Industria. p. 42.

Elaboración propia

Entre los principales rubros de la industria de plásticos destaca la manufactura de productos en base a PET, la cual registró un crecimiento de 7% en el 2003 y 8.3% en el 2004, manteniendo un crecimiento constante a partir de entonces, siendo el rubro más dinámico en la industria durante los últimos años. La fabricación de productos PET viene siendo impulsada por la demanda externa y, principalmente, por el crecimiento de la industria de bebidas gaseosas, que demanda envases elaborados con esta forma primaria de plástico. Asimismo, algunos productos PET son destinados a la industria textil y a la actividad constructora, sectores que muestran actualmente un fuerte crecimiento.

La producción de gaseosas con y sin dulce, agua embotellada de mesa y agua en botellones han incrementado su nivel de producción y ventas en Lima y provincias, como respuesta al aumento del consumo. El buen desempeño de estas industrias está impactando positivamente en la producción de resinas PET para envases que, en el 2008, registró un avance de 2.1% respecto al 2007.

**FIGURA N° 2.8**



Fuente: Ministerio de la Producción – PRODUCE (2008). “Boletín estadístico mensual 2000 – 2008”. Dirección General de Industria. p. 44

Elaboración propia

Un alto porcentaje de los insumos utilizados para la producción de envases PET es importado, por lo que el continuo incremento del precio del petróleo se constituye en el mayor riesgo que enfrenta dicha industria. El 70% de los costos de producción de los envases PET hacen referencia a la resina PET, importada principalmente de Taiwán, China y EEUU. Pese a ello, la fuerte demanda del mercado local continúa siendo atractiva para que la producción de envases PET no se

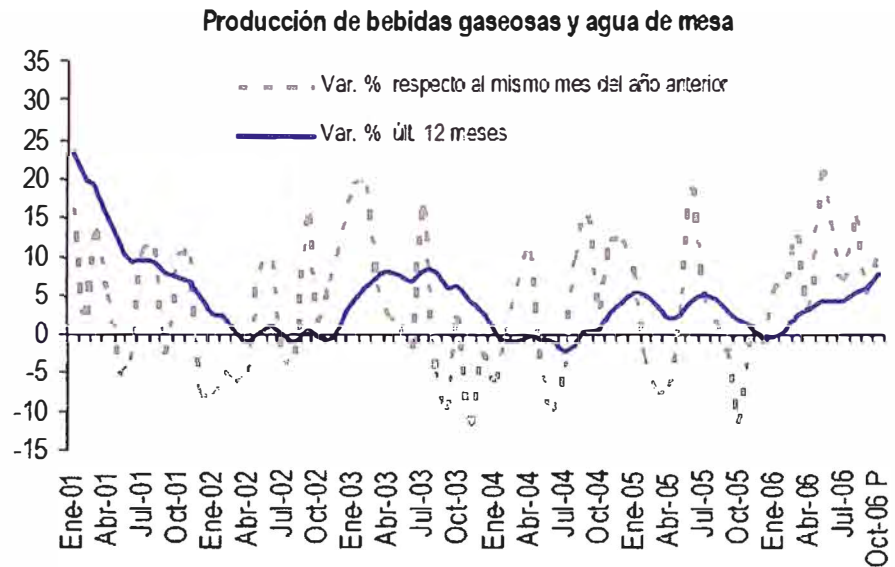
vea limitada, aunque no se descarta un leve aumento en los precios de venta de dichos envases (SNI, Agosto 2008).

El sector de bebidas gaseosas ha mostrado un menor dinamismo frente a otros sectores industriales, la producción de bebidas gaseosas y aguas embotelladas se habría expandido más de 7% en los primeros 10 meses del 2006, impulsada por el mayor consumo privado - en particular en provincias-, las bonificaciones de las embotelladoras a los canales de distribución y el lanzamiento de nuevas marcas y presentaciones. A nivel desagregado, el mayor crecimiento lo ha experimentado la producción de agua de mesa embotellada (cerca de 30%), por encima del de bebidas gaseosas (alrededor de 6%) (Sardón de Taboada, 2006).

La renovación de productos en el mercado de bebidas sigue siendo acelerada, ante la búsqueda, por parte del consumidor, de productos naturales y relacionados con la moda "fitness", como aguas de mesa, néctares y otras bebidas funcionales.

Asimismo, en los mercados urbanos actualmente viene predominando la tendencia del consumidor a orientarse hacia formatos personales, los cuales concentran cerca del 50% de las ventas de agua de mesa. Igualmente, en bebidas gaseosas la demanda se concentra en envases personales y aquellos de contenido igual o superior a 3 litros, cayendo la demanda en los tamaños intermedios (Sardón de Taboada, 2007).

FIGURA N° 2.9



Fuente: Sardón de Taboada, F. (2006). "Sector de bebidas gaseosas. Reporte Especial. Departamento de Estudios Económicos, Scotiabank", Lima. p.2

No obstante, los elevados precios de insumos como el azúcar, los envases PET y las esencias (que representan en conjunto el 60% del costo de producción) siguen afectando los márgenes, en vista de que los precios de las gaseosas han mostrado una leve tendencia decreciente en los últimos meses. Pese a ello, las oportunidades de crecimiento que aún presenta el sector para algunos potenciales participantes han estimulado la incursión de nuevos embotelladores (entre 20 y 30 en el 2006), con lo cual sumarían cerca de 200 en el país. Ello ha intensificado la competencia, ante la mayor agresividad de embotelladores orientados al segmento de bebidas económicas (lo cual sigue generando presiones a la baja en los precios de otras categorías de gaseosas) (Sardón de Taboada, 2006).

Precisamente, ante una posible saturación del mercado local y para diversificar fuentes de ingresos, algunas embotelladoras han intensificado la búsqueda de nuevos nichos de productos y

nuevos mercados geográficos. Respecto a lo primero, ciertos participantes estarían planeando diversificar sus operaciones hacia la fabricación de productos tales como cerveza y de insumos como las resinas para envases plásticos. Con relación a lo último, en cambio, se observaría una mayor atención hacia nuevos mercados fuera de las fronteras nacionales, principalmente en Asia y América Latina, donde algunas marcas económicas locales podrían tener resultados favorables (Sardón de Taboada, 2006).

### **2.1.2 Importaciones en la estructura competitiva del sector**

Uno de los problemas que enfrenta la industria plástica es la fuerte dependencia de los insumos importados; cerca del 99% de los insumos utilizados, como polietileno, policloruro de vinilo, poliestireno, polipropileno, etc. son elaborados por la industria petroquímica de otros países, por lo que sus precios muestran una alta dependencia de la cotización internacional del petróleo, además de la fuerte competencia de los productos importados y la producción informal que utiliza los envases desechados.

En este sentido la coyuntura del mercado petrolero, es aun incierta, principalmente como señala el BCRP, por la falta de inversiones que no permite aumentar la oferta, y la creciente demanda de países emergentes y el alto consumo de países como China e India (consumo que está creciendo por encima de la producción mundial), generando un reducido nivel de inventarios, que mantienen las expectativas de elevados precios en el corto plazo.

Por ello, es necesario acelerar la construcción de un polo petroquímico en el sur, usando el gas de Camisea. Tenemos la gran oportunidad de utilizar nuestros recursos naturales de manera eficiente impulsando la generación de valor agregado, con un impacto positivo en los niveles de empleo y exportaciones. Es necesario crear los mecanismos necesarios

que permitan desarrollar una industria que cambiará nuestra dependencia de insumos derivados del petróleo posibilitando un crecimiento industrial sostenido.

Gracias a la fuerte demanda, el valor importado de los principales insumos plásticos que utiliza esta industria ha venido creciendo sostenidamente en los últimos años, a pesar de los altos precios. Al respecto, en el 2003 el monto importado ascendió a US\$ 350 millones y en el 2007 se registró importaciones por un valor de US\$ 964 millones, es decir, 176.3% de crecimiento (SNI, Agosto 2008).

**FIGURA N° 4.11**



Fuente: Sociedad Nacional de Industrias. (2008). Revista Institucional. Edición N° 825, Agosto 2008. p.19

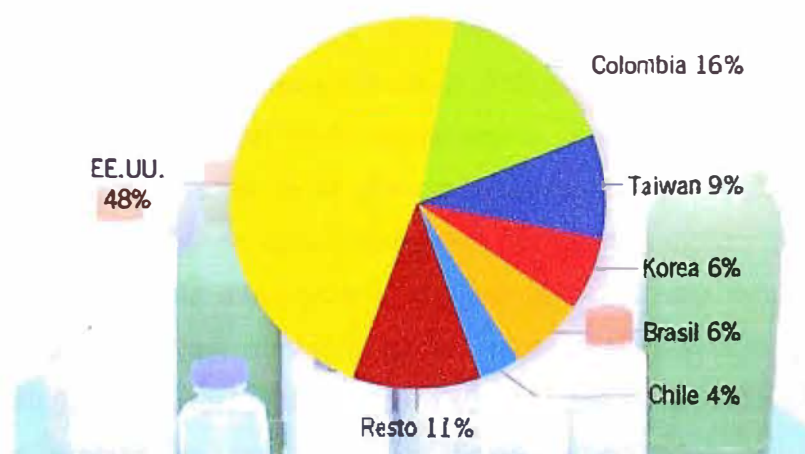
Respecto al año 2006, este crecimiento en la importación de insumos fue de 7.6%, variación similar a la que se registró en el precio de los insumos, por el fuerte impacto del precio del petróleo. Y en el acumulado enero a mayo de este año se han importado US\$ 425.5 millones, es decir, 32.1% más respecto a similar período del año anterior (Sardón de Taboada, 2006).

En cuanto a los principales países de origen de las importaciones de estos insumos plásticos, éstas se encuentran concentradas en seis países, liderados por EE.UU. (48% del total) de donde se importa en mayor medida polipropileno en

formas primarias siendo el principal importador la empresa OPP Film S.A. (69% del total) y polietileno de alta y baja densidad. El segundo país origen de las importaciones es Colombia (16%) donde se han realizado mayores compras de resina de PVC sin mezclar con otras sustancias, teniendo una mayor participación en estas compras la empresa Unimar S.A. (44%) y Amanco del Perú S.A. (20%).

Otros países, que han sabido desarrollar una industria petroquímica y que producen insumos plásticos son Taiwan, de donde se exportaron US\$ 49 millones de politereftalato de etileno (resina PET para envases) siendo el principal importador San Miguel Industrial y la empresa Amcor Pet Packaging del Perú; y la República de Corea de donde se han exportado en el 2007 US\$ 17.6 millones de polietileno de alta densidad y US\$ 8.9 millones de polietileno de baja densidad.

**FIGURA N° 2.12**  
**PROCEDENCIA DE LAS IMPORTACIONES DE PRINCIPALES INSUMOS PLÁSTICOS, AÑO 2007**



Fuente: Sociedad Nacional de Industrias. (2008). Revista Institucional. Edición N° 825, Agosto 2008. p. 20

**FIGURA N° 2.13**

**IMPORTACIÓN DE PRINCIPALES INSUMOS DE LA INDUSTRIA PLÁSTICA,  
POR EMPRESA VALOR CIF EN MILLONES DE DÓLARES**

Empresas	En-Dc	Enero-Mayo		Var %
	2007	2007	2008	
San Miguel Industrial S.A.	57.7	10.9	32.7	199.4
Opp Film S.A.	48.7	15.1	28.7	90.3
Dispercol S A	33.6	10.3	30.1	192.7
Amtor Pet Packaging del Perú S.A.	30.0	3.0	12.4	313.1
Unimar S.A.	22.4	10.1	10.4	3.4
Nicolli Perú S.A.	17.1	4.6	12.6	175.3
Consortio Unipetro S.A.C.	16.4	6.8	9.7	43.7
Polimaster S.A.C.	15.5	6.9	6.6	-4.3
Polinplast S.A.C.	14.9	6.0	8.0	34.0
Peruplast S.A.	13.6	4.7	8.4	79.3
Otras Empresa	289.9	125.3	158.0	26.1
<b>Total</b>	<b>559.8</b>	<b>203.5</b>	<b>317.6</b>	<b>56.0</b>

Fuente: Sociedad Nacional de Industrias. (2008). Revista Institucional. Edición N° 825, Agosto 2008. p.20

### 2.1.3 Evolución de los precios en la industria

Los precios de los productos plásticos se han mantenido prácticamente estancados en los últimos años, ante la fuerte competencia interna y el ingreso de productos importados. Solamente algunos rubros experimentaron un alza en sus precios ante la recuperación de la demanda interna, en tanto que otros mostraron leves incrementos desde principios del presente año, ante la tendencia alcista en los precios del petróleo, invirtiendo este proceso en los últimos meses con la caída del precio internacional del petróleo. De este modo, la capacidad de las empresas de la industria de plásticos para trasladar incrementos de costos a sus clientes es limitada.

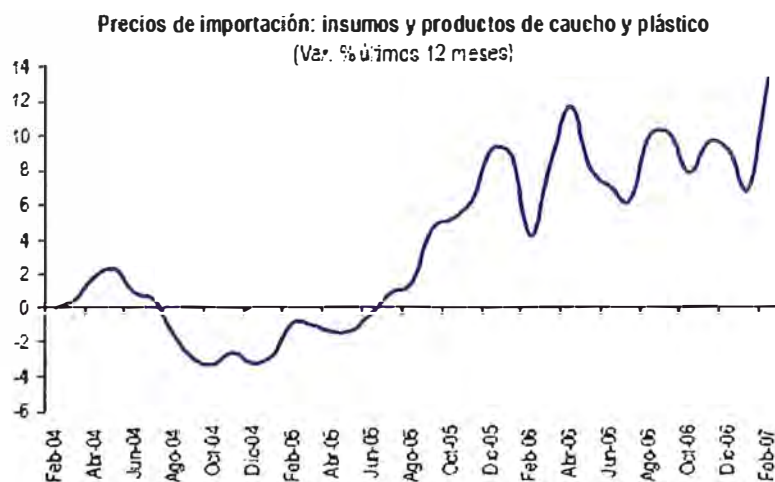
Los precios de los productos finales importados se han mantenido relativamente bajos, pese al sostenido incremento en los precios internacionales del petróleo, lo cual se debería en parte al ingreso de productos a precios subvaluados (dumping). No obstante, en la medida en que se mantenga la tendencia a la baja en los precios internacionales del petróleo,



los precios de tales productos importados experimentarán nuevas presiones a la baja.

De otro lado, el 100% de las materias primas de la industria son de origen importado (resinas y plásticos en formas primarias), por lo que sus precios muestran una alta dependencia de la evolución de la cotización internacional del petróleo. Finalmente, la sostenida apreciación del Nuevo Sol tiene un impacto positivo en la estructura de costos de las empresas transformadoras de plásticos, por la importancia de sus insumos importados en los costos totales, lo que compensa el efecto negativo del incremento en los precios del petróleo y sus derivados. No obstante, este comportamiento del tipo de cambio es negativo para los ingresos por exportación, afectando a aquellos rubros de plásticos cuyos ingresos dependen significativamente de las exportaciones (básicamente PET y polipropileno).

**FIGURA N° 4.15**



Fuente: Sardón de Taboada, F. (2006). "Sector de bebidas gaseosas. Reporte Especial". Departamento de Estudios Económicos, Scotiabank. p.2

#### **2.1.4 Inversiones en el sector**

Una de las ventajas competitivas que se ha estado formando en el sector ha sido la continua modernización tecnológica por parte de la mayoría de empresas participantes, con el objetivo de mantener una elevada competitividad tanto en el mercado local como en los de exportación.

La participación de multinacionales extranjeras en la industria local, tales como Amcor y Alusud, ha contribuido de manera importante a esta tendencia, por medio de transferencias de tecnología.

Impulsada por el notable crecimiento de la demanda tanto interna como externa, en el 2006 la industria de plásticos mostró un notable dinamismo, creciendo 6.1% frente al año anterior y alcanzando ventas anuales por casi US\$ 1,100 millones. De este modo, la expansión de la industria respondió en gran medida al sostenido crecimiento de la demanda proveniente de diversos sectores económicos, destacando los rubros fabricantes de productos de agroexportación, bienes de consumo masivo, la industria pesquera y el sector construcción, entre otros. De otro lado, las favorables condiciones financieras predominantes en el mercado local en los últimos años han permitido a un importante número de empresas del sector mejorar sus indicadores de solvencia y liquidez y acceder al financiamiento necesario para emprender proyectos de ampliación de capacidad instalada y de reconversión industrial. De este modo, la industria plástica ha elevado su eficiencia productiva, el valor agregado de sus productos y el número de los mismos, incrementando la gama de necesidades que cubren (SNI, Agosto 2008).

No obstante, la industria presenta una intensa competencia, no solo en el segmento formal, sino también de parte de fabricantes informales (que finalmente atienden a poco más del 30% de la demanda local), en parte por los relativamente bajos costos asociados al ingreso al mercado (adquisición de

tecnología productiva). Esta situación ha estado traduciéndose en una constante presión a la baja sobre los márgenes de utilidad, también asociada a los elevados precios de las principales materias primas e insumos (resinas, elaboradas a partir de hidrocarburos, y el petróleo) y al creciente poder de negociación de clientes como las cadenas minoristas. De otro lado, la industria enfrenta también la competencia de sustitutos cercanos del plástico para algunas aplicaciones, tales como la fibra de vidrio.

Pese a estos factores, el sector muestra fortalezas que han incrementado su atractivo en la región y alentado un importante flujo de inversiones al mismo. En este sentido, por ejemplo, la reducción arancelaria de 12% a 4% para algunos insumos industriales, como las resinas, habrían motivado a empresas latinoamericanas para establecer operaciones en el país, motivadas por los menores costos de materias primas. De otro lado, también se aprecian fortalezas a nivel de rubros específicos de productos plásticos. Así, el rubro de sacos de polipropileno viene diversificando su mercado objetivo, dado que en la actualidad solo el 30% de sus productos se orientan al sector de harina de pescado y sus exportaciones están incrementándose. Por su parte, la demanda de envases PET muestra cada vez un mayor dinamismo en el segmento de aguas embotelladas, mientras que la fabricación de productos plásticos para la construcción crece a un ritmo cercano al 15% anual (Sardón de Taboada, 2007).

A nivel desagregado, la demanda de sacos de polipropileno para el sector pesquero podría aumentar en el 2010, en tanto el volumen exportado de harina de pescado experimente un crecimiento en el presente año. Por su parte, la industria de tapas plásticas también se expandiría, ante la creciente demanda de embotelladoras de bebidas, en particular de agua de mesa (cuya demanda se elevaría 17% este año). El caso de este segmento es característico del sector de plásticos en

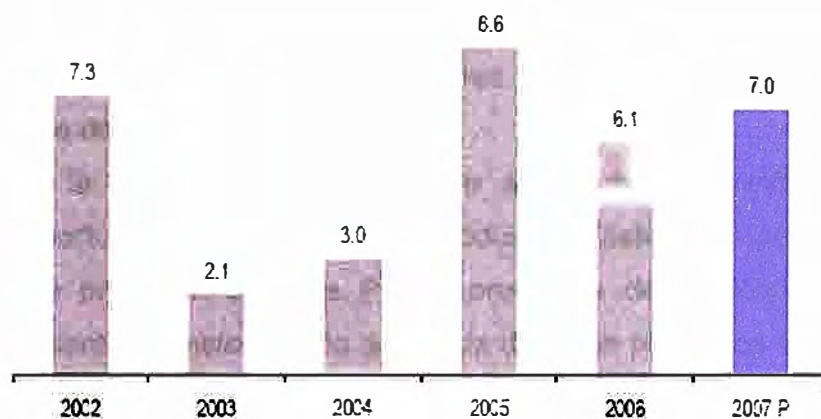
general, dado que sectores no tradicionales para el rubro de tapas plásticas, como el farmacéutico, de productos de limpieza y alimentos como aceite comestible, han incrementado sostenidamente su demanda por tapas, motivando a las empresas del rubro a elevar sus inversiones a fin de aumentar el valor agregado y la especialización de sus productos.

De otro lado, las empresas del sector continuarían invirtiendo en modernizar maquinaria y equipo a fin de estar en capacidad de atender la creciente demanda interna y externa. Al respecto, se invirtió cerca de US\$ 170 millones en la industria de productos plásticos en el 2008. El potencial de crecimiento del sector atraería a nuevos competidores, tanto nacionales como extranjeros, lo que hace prever que en el presente año la industria continuaría consolidándose, con nuevos acuerdos de compra o fusión de empresas.

De esta manera, las inversiones programadas, tanto para fines de reconversión industrial como para ampliación de capacidad productiva, permitirán a la industria enfrentar la creciente competencia interna y externa, así como mejorar sus ventajas competitivas. Al respecto, las oportunidades en los mercados del exterior, sobre todo en América Latina, son considerables, y en el 2008 siguieron viéndose favorecidas por la fijación de contratos de abastecimiento a plazos relativamente largos con los clientes. Asimismo, el potencial de crecimiento de las ventas de productos plásticos a las industrias de exportación es elevado, y podría mejorar en el mediano plazo con el proyecto Sierra Exportadora y la firma de nuevos tratados comerciales.

**FIGURA N° 2.16**

**Industria con mayor dinamismo en el 2007**  
(Var. % de la producción respecto al año anterior)



Fuente: Ministerio de la Producción. Elaboración y proyección: Estudios Económicos - Scotiabank

Fuente: Sardón de Taboada, F. (2007). "Sector de bebidas gaseosas. Reporte Especial". Departamento de Estudios Económicos, Scotiabank. Perú, p.2

## 2.2 Perspectivas del sector

La industria de plásticos en el Perú tiene un interesante potencial de crecimiento en el mediano plazo, tanto por el lado de la demanda interna como en sus exportaciones. Sin embargo, el sector muestra una serie de debilidades que afectan su desempeño, tales como la fuerte dependencia de insumos importados, la intensa competencia interna y la persistencia del contrabando y la producción informal. Asimismo, existe un conjunto de riesgos que podrían perjudicar a las empresas de la industria, destacando entre ellas el potencial impacto negativo del ruido político sobre las inversiones en el sector, una eventual desaceleración del crecimiento económico y la posibilidad de que continúen incrementándose los precios del petróleo y los derivados de la industria petroquímica. Entre los factores positivos para el sector, destacan la alta competitividad alcanzada, gracias a las inversiones realizadas, la diversificación de los diferentes tipos de productos y la constante penetración en nuevas aplicaciones y usos para los mismos.

De otro lado, el poder de negociación de las empresas transformadoras de plásticos frente a sus clientes y proveedores es relativamente bajo, y la competencia interna es intensa, lo que restringe el crecimiento de la rentabilidad en la industria. No obstante, la amenaza de sustitución de los productos plásticos por otro tipo de bienes es poco significativa, así como el ingreso de nuevos competidores.

Al interior de la industria, los rubros que aprovecharían mejor las fortalezas y oportunidades del sector de productos plásticos en general serían los que producen envases PET y productos de polipropileno, dado el crecimiento previsto para la demanda de estos productos en los mercados externos.

Asimismo, las ventas de P.V.C. también continuarían incrementándose en los próximos meses y durante el 2010, considerando el renovado impulso a la actividad constructora por parte del sector privado. Por el contrario, los rubros que se verían más afectados por las debilidades y riesgos que engloba la industria de plásticos serían los de polietileno y poliestireno, dada la fuerte competencia interna y de los productos importados. De esta manera, tomando en cuenta a la industria en su conjunto, prevemos que ésta crecería alrededor de 2.2% en el 2010 y 3% el próximo año. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta que, al interior de la industria local de plásticos, las perspectivas de algunos rubros son más bien modestas, a diferencia de otros, tales como el de productos PET, que se cuentan con mejores ventajas competitivas.

La producción de envases plásticos es la que predomina con cerca al 46% de participación, siendo la de preformas y envases PET las que mayormente vienen impulsando esta línea. Secundando la demanda de envases PET, se encuentran otros productos como cilindros, galoneras, sacos, bolsas, mangas, láminas, pisos. Entre otros productos plásticos que complementan el mercado local figuran las tuberías, artículos de menaje, de vestimenta y de oficina. Los insumos necesarios para el desarrollo del proceso productivo de esta industria provienen de la petroquímica de origen extranjero en un 99% (SNI, Mayo 2008).

La industria de plásticos ha crecido sostenidamente en los últimos años, esto impulsado por la reactivación de la demanda interna y una

creciente apertura económica de la mano con un impacto positivo a nivel mundial sobre las exportaciones, esto generó una importante modernización tecnológica por parte de la mayoría de empresas peruanas para mantener competitividad interna y externa.

### **2.3 Situación Ambiental del sector**

El impacto ambiental en la producción de materias primas y en la industria transformadora de resinas plásticas es poco significativo debido a factores tales como: la no utilización de combustibles fósiles, bajo consumo de energía eléctrica, poca demanda de agua, muy bajo nivel de emisiones atmosféricas y vertimientos y facilidad de reciclar los residuos sólidos industriales, en particular los termoplásticos, dentro de sus procesos o en los de otras industrias.

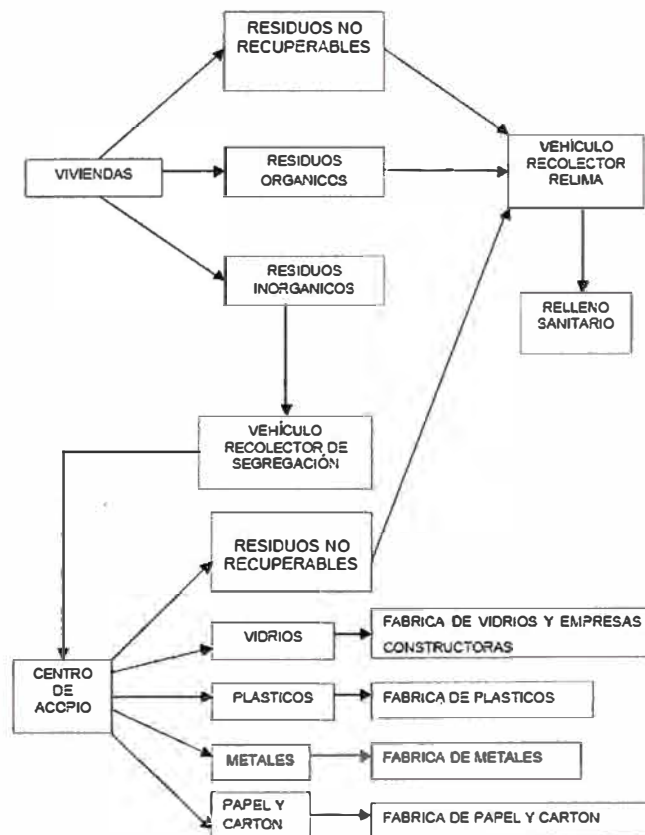
Por su parte, la disposición final de los residuos plásticos tiene un impacto ambiental en la medida en que los residuos sólidos sean eliminados en botaderos a cielo abierto; siendo ésta una práctica que predomina en la mayoría de los municipios del Perú. Según la Política de Manejo Integral de Residuos Sólidos expedida por el Ministerio de de Producción, esta práctica se ha favorecido por: (1) la falta de aplicación de tecnologías alternativas para el tratamiento, aprovechamiento y disposición final de los residuos; (2) falta de coordinación interinstitucional del tema; (3) falta de recursos financieros por parte de los municipios; (4) énfasis en la determinación de los costos de recolección y transporte de forma que la tarifa de aseo no involucra los costos reales de un sistema de eliminación, tratamiento o disposición final; (5) falta de empresas de aseo consolidadas que ofrezcan alternativas en el manejo de los residuos sólidos (las empresas establecidas ofrecen las tradicionales fases de recolección, transporte y disposición final, únicamente), entre otras, todo lo cual origina un desconocimiento a nivel municipal de la existencia de tecnologías alternas para el manejo de los residuos sólidos.

Desde el 2000 el Estado Peruano ha tomado medidas para reglamentar el aprovechamiento y valorización de los residuos sólidos como son: (1) La Política de Manejo Integral de Residuos Sólidos; (2) La Ley General

de Residuos Sólidos, Ley N° 27314 del 2000 y su reglamento y probado en el 2004, y una serie de disposiciones a nivel legal que impulsan la separación en la fuente de los diferentes tipos de residuos domiciliarios, la recolección selectiva de los residuos, la existencia de centros de acopio y el fomento de las actividades propias de la recuperación de los residuos como el reciclaje y el compostaje.

En el caso de los plásticos, la situación a lo largo de los años no ha sido muy distinta a la de los otros materiales. La falta de separación en la fuente y la gran variedad de plástico que existe en el mercado de difícil identificación por parte del productor, representan algunos de los mayores problemas para su selección y posterior tratamiento.

**FIGURA N° 2.17**  
**SISTEMA OPERACIONAL DEL PLAN DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS**



Fuente: Chung Pinzás, Alfonso (2003). "Análisis económico de la ampliación de la cobertura del manejo de residuos sólidos por medio de la segregación en la fuente en Lima Cercado". Perú. p.71

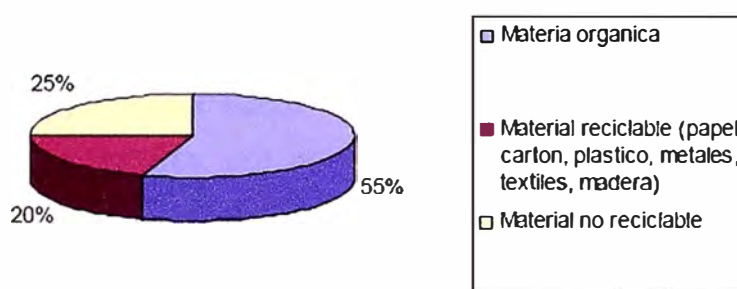


## 2.4 Composición de los residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos, conocidos también como residuos post-consumo, varían en su composición de ciudad a ciudad en función de muchas variables. Entre estas se cuentan las características del consumo de bienes y el poder adquisitivo de la población, la conciencia sobre la importancia de no contaminar el medio ambiente, la cultura ciudadana existente para el manejo de los residuos, la existencia de programas de separación en la fuente y de recolección selectiva de residuos sólidos y los procedimientos o tecnologías aplicadas para el tratamiento de los residuos urbanos (incineración, reciclaje y otras alternativas).

FIGURA Nº 2.18

### COMPOSICION DE LOS RESIDUOS SOLIDOS



Fuente: Ministerio de la Producción – PRODUCE. (2008). "Boletín estadístico mensual 2000 – 2008". Dirección General de Industria. p. 35-50.

Elaboración propia

## 2.5 Consumo de plásticos y generación de residuos plásticos urbanos

Los residuos sólidos que se encuentran en un hogar promedio, están compuestos por una mezcla de: plásticos, textiles, metales, aluminio, papel, cartón, vidrio y residuos orgánicos (cáscaras de fruta, residuos de comida, etc.). En general, se considera que un tercio del peso total y la mitad del volumen de todos estos sobrantes está constituido por materiales de empaque, y de este último rubro, aproximadamente 20%

corresponde a plásticos, los cuales tienen un ciclo de vida muy corto, y esto provoca que una gran cantidad de energía, así como los materiales no renovables utilizados en su producción, se pierdan si estos componentes no son recuperados oportunamente (PRODUCE, 2008).

Pero además, cuando estos plásticos se envían a un relleno sanitario, se corre el riesgo de que contaminen no sólo el suelo sino el agua presente debajo de la base del relleno sanitario, misma que frecuentemente constituye una fuente de agua pura.

Los plásticos, cuando no son desechados adecuadamente, pueden causar la muerte de algunos animales que los confunden con comida, como ha ocurrido con las tortugas marinas, y también puede suceder que se quedan atrapados en ellos, como es el caso de algunas aves que se enredan en los arillos de plástico usados para empacar latas de aluminio.

Por último, si no existe una normatividad que regule sus procesos de fabricación, los artículos de plástico pueden llegar a ocurrir algunos problemas. Uno de ellos puede ser el contenido de sustancias tóxicas susceptibles de causar daños a la salud; por ejemplo, el caso de la confección de juguetes (por lo común, de muy bajo costo) para niños pequeños; con PVC (Poli Cloruro de Vinilo), en cuya fabricación se utilizan sustancias plastificantes llamadas ftalatos que son extremadamente dañinas para la salud. Otro problema derivado de la falta de regulación es que la vida útil de los materiales pueda disminuir aún más debido a su baja calidad.

La industria de transformación de los plásticos, en el Perú y en el mundo, produce bienes de consumo y bienes intermedios. Dadas las múltiples aplicaciones, propiedades, características y durabilidad de las manufacturas, éstas tienen una vida útil variable, existiendo productos con una durabilidad de largo plazo (mayor a 6 años y en varios casos de 50 ó más años), otros de mediano plazo (1 a 6 años) y algunos de corto plazo (15 días a 1 año).

En la figura N° 2.19 se pueden visualizar algunos ejemplos de vida útil de los plásticos de consumo masivo:

Considerando el concepto de vida útil, se puede afirmar que el volumen de residuos plásticos urbanos será siempre inferior al total del consumo de plásticos. En el caso peruano, el consumo de plásticos en el periodo 1997 a 2000 está alrededor de las 530.000 toneladas anuales, en tanto que el volumen de residuos plásticos urbanos estimada se encuentra entre 220.000 y 280.000 toneladas / año (PRODUCE, 2008).

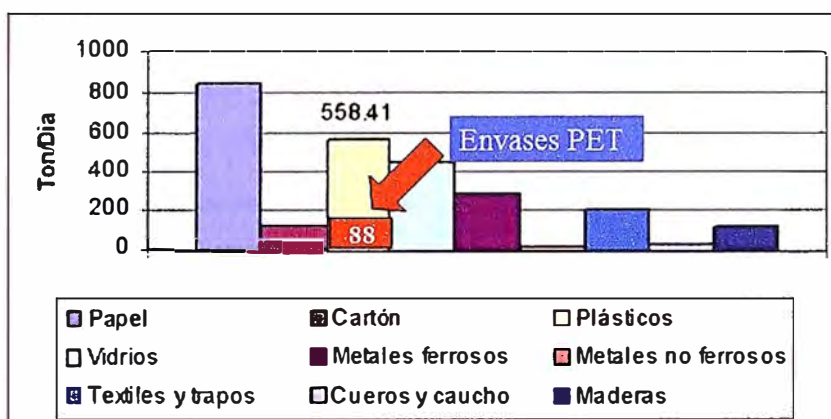
**FIGURA N° 2.19**  
**VIDA ÚTIL DE ALGUNOS PLÁSTICOS**

Tuberías de PVC en construcciones	Vida de la vivienda
Tuberías de PVC en infraestructura	Hasta 50 años
Cajas de polipropileno para herramientas	10 a 15 años
Cajas de polietileno de alta densidad para bebidas	5 a 7 años, en promedio
Películas de invernadero de polietileno	2 a 3 años
Envases para productos de higiene y aseo	1 a 2 años
Bolsas plásticas de polietileno	Menor de 1 año
Envases PET	Menos de 6 meses o más de 1 año si son retornables

Fuente: Guía Ambiental – Sector Plásticos. 2004. Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo. Colombia, p.20

Los residuos plásticos de post consumo, están constituidos principalmente por envases de PET (Polietilén tereftalato), PEAD (polietileno de alta densidad), PEBD (Polietileno de baja densidad), PP (Polipropileno); así como envases constituidos por multicapas o similares. Este tipo de residuos sólidos se encuentran en calles, avenidas y botaderos de todas las ciudades del país; así como, flotando en canales de riego, ríos, lagos y mares, generando problemas de deterioro del paisaje, contaminación del aire por la quema o persistencia en el medio por el bajo nivel de biodegradación.

**FIGURA N° 2.20**  
**PARTICIPACIÓN DE LOS RESIDUOS DE ENVASES DE PLÁSTICOS**  
**PET EN LA GENERACIÓN DE RSU EN EL PERÚ**



Fuente: Grupo Técnico Nacional sobre gestión de empaques rígidos para productos de consumo masivo. (2005). Informe Final. p.18

Los actuales patrones de consumo están orientados a una creciente generación de residuos plásticos (bolsas, botellas y otros empaques). Esta situación está ocasionando problemas ambientales debido a los componentes no biodegradables de los plásticos, que al ser quemados, emanan gases tóxicos. Adicionalmente, la relación peso – volumen de los plásticos es uno de los grandes problemas actualmente en los lugares de disposición final ya que los niveles de compresibilidad se han reducido mientras que el volumen de los residuos se ha incrementado, dicha situación está reduciendo la vida útil de los lugares de disposición final.

### CAPÍTULO III

## EL POLIETILÉN TEREFALATO (PET)

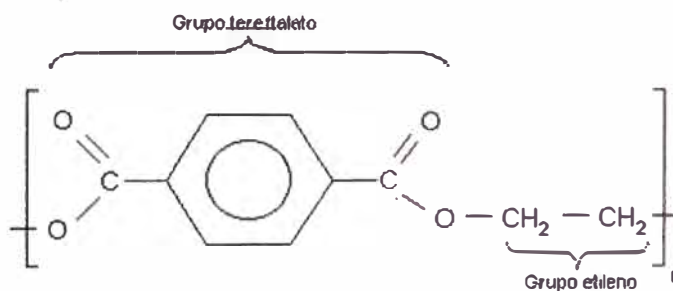
El Polietilén Tereftalato (PET) es un polímero de condensación formado a partir del dimetiltereftalato (DMT) y el etilenglicol (EG). El DMT es obtenido como un subproducto de la refinación del petróleo y el EG es un subproducto del gas natural.

El PET fue patentado como un polímero para fibra por J. R. Whinfield y J. T. Dickinson en 1941. Catorce años más tarde, en 1955 comenzó la producción comercial de fibra de poliéster. Desde entonces hasta hoy en día, la fabricación de PET ha presentado un continuo desarrollo tecnológico, logrando un alto nivel de calidad y una diversificación en sus empleos.

A partir de 1976 se emplea el PET en la fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes, principalmente para bebidas, los cuales, al principio eran botellas gruesas y rígidas, pero hoy en día, sin perder sus excelentes propiedades como envase, son mucho más ligeros.

La estructura de la unidad repetitiva que forma el polímero de PET, está compuesta por un grupo tereftalato y un grupo etileno, unidos por un enlace éster, lo que posibilita que el PET sea uno de los polímeros termoplásticos más versátiles en ingeniería.

**FIGURA N° 3.1**  
**UNIDAD REPETITIVA DEL PET**



Fuente: López Fole, Marta. (2006). "Estudio comparado de procesos para el reciclado químico de PET". España, p.30.

El PET es un polímero que habitualmente se transforma mediante un proceso de inyección-estirado-soplado. Durante este proceso las moléculas del polímero se orientan en dos direcciones distintas. En el caso de los envases la orientación tiene lugar según una dirección longitudinal, paralela al eje del envase, y según una dirección transversal al mismo. Es precisamente esta propiedad, conocida como biorientación, la que confiere al PET una elevada resistencia mecánica, lo que unido a su transparencia, hace que resulte un material idóneo para el envasado de productos líquidos.

En particular, los envases de PET resultan especialmente adecuados para contener líquidos a presión, siendo el envasado de bebidas carbónicas la principal aplicación. Además, el abaratamiento en los costos de fabricación y el desarrollo de tecnologías que mejoran substancialmente las propiedades de las botellas de PET han permitido un crecimiento notable del número de sus aplicaciones. Entre ellas cabe destacar el envasado de agua mineral, aceite, zumos, bebidas isotónicas, detergentes, productos de higiene corporal, productos farmacéuticos, etc. Pero las aplicaciones de este polímero no se limitan a las botellas, también es utilizado para la fabricación de fibras textiles para la confección de ropa, cinturones y bolsas de seguridad, cintas de video y audio, películas de rayos X y de fotografía, etc.

El peso molecular promedio de las diferentes presentaciones del PET oscila entre 15000 (grado de viscosidad bajo) y 36000 (grado de viscosidad alto). El peso molecular del PET es normalmente especificado en términos de un parámetro de viscosidad para la solución, por ejemplo, Viscosidad Intrínseca (I.V.) (Fakyrov, 2002).

**CUADRO Nº 3.1**  
**CLASIFICACIÓN DE PET SEGÚN SU PRESENTACIÓN**

	PET grado botella	PET grado fibra	PET film
<b>Peso molecular, <math>M_n</math> (g/mol)</b>	24 000 - 36 000	15 000 - 20 000	18 750
<b>I.V. (dL/g)</b>	0.75 - 1	0.55 - 0.67	0.64
<b>Estándar IV (dL/g)</b>	0.8	0.64	0.64
<b>Características</b>	<p>Es amorfo, con gran transparencia. Posee excelentes propiedades mecánicas y de barrera contra gases y mejor ductilidad y capacidad de termodeformación que el PET semicristalino.</p> <p>Eventualmente presenta orientación biaxial para mejorar las características mecánicas y de barrera en su aplicación para envases o botellas. Debe seguir regulaciones en cuanto a composición cuando se destina a envasado de alimentos o bebidas, a los cuales no extrae ni transfiere sabores</p>	<p>Las fibras están caracterizadas por tener elevada cristalinidad y orientación monoaxial. Tiene buena resistencia, rigidez y dureza, además de ser dúctil. Las fibras presentan forma alargada y un contenido entre el 0,03% y el 0,04% de dióxido de Titanio (<math>TiO_2</math>).</p>	<p>Para reducir la tendencia tenaz del producto final, presenta aditivos sólidos como dióxido de silicio (<math>SiO_2</math>) o arcilla china con tamaños de partícula específicos. El producto final, BOPET, es un film de PET orientado de forma biaxial con alta resistencia mecánica y un grosor entre 1 y 180 <math>\mu m</math>.</p>

Fuente: López Fole, Marta. (2006). "Estudio comparado de procesos para el reciclado químico de PET". España, p.30.

El PET es un polímero que pertenece al grupo de los poliésteres termoplásticos y en su uso como fibra o plástico es decisivo el grado de orientación o cristalinidad que se desarrolla al procesarlo.

El PET se presenta en el mercado de diversas maneras, destacando las siguientes:

PET grado botella.

PET grado fibra.

PET film.

Dichas presentaciones difieren en el peso molecular, en la viscosidad intrínseca (I.V.), en la apariencia y en la forma de producción. Además, el PET grado fibra difiere en que lleva cierta cantidad de co-monómeros, estabilizantes, catalizadores metálicos y colorantes.

En el cuadro N° 3.1 se pueden observar las características del PET según su presentación.

### **3.1 Síntesis del PET**

Básicamente, la formación de cadenas de PET comprende dos reacciones principalmente:

- i) Reacción de esterificación de grupos carboxílicos con grupos hidroxilos terminales dando glicolésteres.
- ii) Reacción de transesterificación de los glicolésteres con grupos hidroxilos terminales o policondensación.

Existen diversas formas de sintetizar el PET, principalmente mediante la reacción de esterificación de ácido tereftálico (TA) y etilenglicol (EG) o mediante la transesterificación de dimetiltereftalato (DMT) y EG.

Según la presencia de catalizadores y aditivos en la polimerización, se producen los distintos grados del PET.

#### **3.1.1 Transesterificación de ácido tereftálico y etilenglicol**

La síntesis del PET requiere una reacción de policondensación en dos pasos, el primero de los cuales consiste en la esterificación del TA con el EG, formando el monómero bis(hidroxiethyl) tereftalato (BHET) y cadenas cortas de oligómeros, además de agua que es eliminada mediante sistemas de columnas. El segundo paso de la reacción es una polimerización por etapas (policondensación) para producir un polímero de cadena larga, en el cual tiene lugar una

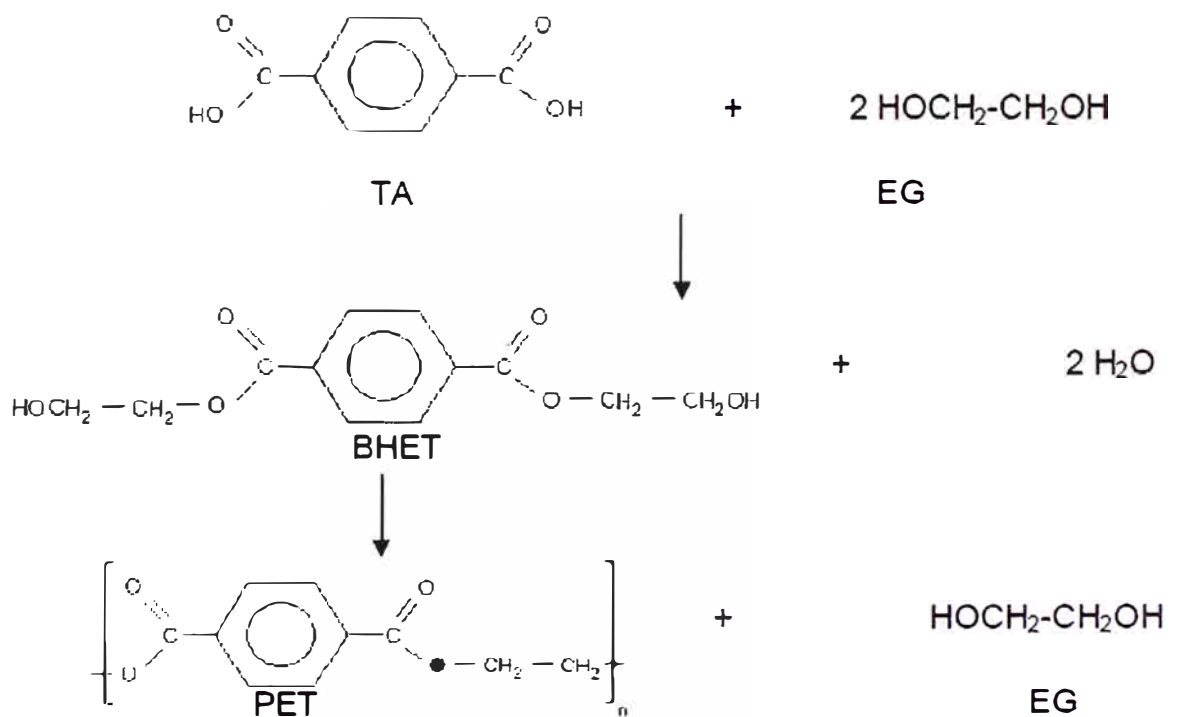


transesterificación en fase fundida y la producción de EG como producto, que es eliminado del fundido mediante vacío.

Mediante una polimerización interior en fase sólida, se alcanza el peso molecular necesario para envases, denominándose PET botella al tipo de polímero que resulta.

El PET solidificado se introduce en una extrusora de orificios múltiples que proporciona un hilo fino y alargado que se enfría en agua. En estado semisólido se corta con un peletizador y se obtiene PET en forma granulada.

**FIGURA Nº 3.2**  
**REACCIÓN DE SÍNTESIS DE PET A PARTIR DE TA Y EG**



Fuente: López Fole, Marta. 2006. "Estudio comparado de procesos para el reciclado químico de PET". España, p.32.

### 3.1.2 Transesterificación de dimetiltereftalato y etilenglicol

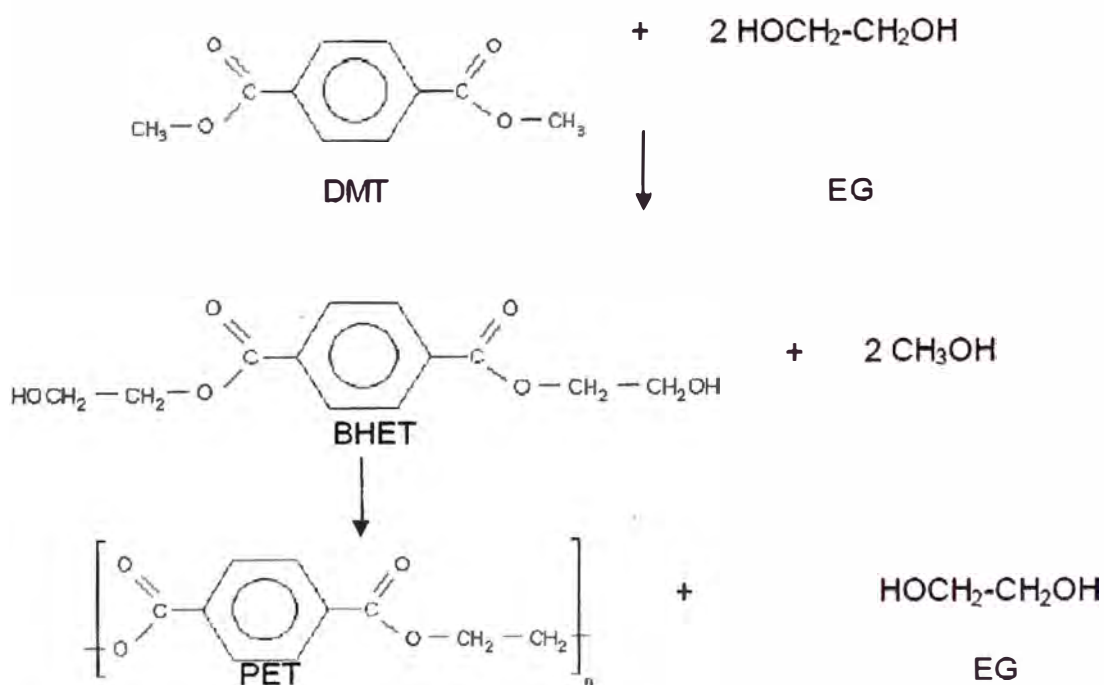
La manera habitual de sintetizar el PET en sus comienzos era a partir de la reacción de transesterificación de DMT y EG. El motivo era la gran dificultad en la purificación del TA hasta el grado requerido para la polimerización.

El resultado de dicha reacción es la obtención de BHET y metanol (MetOH), que puede ser eliminado por evaporación si la reacción se lleva a cabo a una temperatura suficientemente elevada para tal efecto, sin que llegue a evaporar el BHET.

Esta reacción se ha visto sustituida en gran escala por la del apartado anterior desde que el TA fue producido con pureza adecuada.

Una vez obtenido el BHET, se efectúa una policondensación igual a la de la transesterificación de ácido tereftálico y etilenglicol para la obtención de PET.

**FIGURA Nº 3.3**  
**REACCIÓN DE SÍNTESIS DE PET A PARTIR DE DMT Y EG**



Fuente: López Fole, Marta. (2006). "Estudio comparado de procesos para el reciclado químico de PET". España, p.33.

### 3.2 Propiedades del PET

#### 3.2.1 Propiedades estructurales

El PET tiene tres estados estructurales; cristalino, orientado y amorfo. Las propiedades relativas de los tres estados se observan en el siguiente cuadro:

**CUADRO N° 3.2**  
**PROPIEDADES RELATIVAS A LOS ESTADOS ESTRUCTURALES**  
**DEL PET**

PROPIEDAD	CRISTALINO	ORIENTADO	AMORFO
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Alta (1.40)	Moderada (1.37)	Baja (1.33)
Resistencia a la tensión	Alta	Alta	Baja
Resistencia al impacto	Baja	Alta	Moderada
Plasticidad	Muy baja	Baja	Alta
Apariencia	Opaca	Clara	Clara
Volumen libre	Muy bajo	Bajo	Alto
Permeabilidad a O <sub>2</sub> *	Baja (3.4)	Baja (3.95)	Alta (8.47)
Permeabilidad a CO <sub>2</sub> *	Baja (23.1)	Baja (26.7)	Alta (56.0)
Permeabilidad a H <sub>2</sub> O*	Baja (1.39)	Baja (1.83)	Alta (4.6)

(\*) CC-mil/100 pulg /24h/1 atm

Fuente: Ramírez, J., et. al. (2004). "Depolimerización de polietilentereftalato (PET) como alternativa de reciclado". Colombia, p. 25

### 3.2.2 Propiedades físicas

**CUADRO N° 3.3**  
**PROPIEDADES FÍSICAS DEL PET**

PROPIEDAD	VALOR
Absorción de agua - Equilibrio (%)	< 0.7
Absorción de agua - en 24 horas (%)	0.1
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.3 - 1.4
Índice refractivo	1.58 - 1.64
Índice de oxígeno límite (%)	21
Inflamabilidad	Auto extinguiible
Resistencia a los Ultra-violetas	Buena

Fuente: Ramírez, J., et. al. (2004). "Depolimerización de polietilentereftalato (PET) como alternativa de reciclado". Colombia, p. 25

### 3.2.3 Propiedades eléctricas

Presenta alta rigidez dieléctrica y resistencia transversal. Su propiedad dieléctrica hace que sea adecuado para diferentes aplicaciones electrónicas. Es un buen aislante térmico.

**CUADRO N° 3.4**  
**PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL PET**

PROPIEDAD	VALOR
Constante dieléctrica a 1MHz	3.0
Factor de disipación a 1 KHz	0.002
Resistencia dieléctrica (kV/mm)	17
Resistividad superficial (Ohm/s)	$10^{13}$
Resistividad de volumen (Ohm.cm)	$> 10^{14}$

Fuente: Ramírez, J., et. al. (2004). "Depolimerización de polietilentereftalato (PET) como alternativa de reciclado". Colombia, p. 26

### 3.2.4 Propiedades químicas

Buena resistencia al medio. Se pueden utilizar aditivos para obtener una resistencia mayor. Arde con hollín y llama amarillo-naranja, gotea y produce un olor aromático dulce. Irritante al olfato. Su propagación a la llama es débil y su combustión lenta. Es resistente ante la presencia de ácidos y bases débiles, aceites, grasa, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, tetracloruro de carbono. No presenta buena resistencia ante ácidos y bases fuertes, fenoles ni la acción prolongada de agua caliente (hidrólisis). Debido a esto el PET solo puede ser esterilizado en una atmósfera de oxido de etileno o por irradiación.

**CUADRO N° 3.5**

**PROPIEDADES QUÍMICAS DEL PET**

**RESISTENCIA QUIMICA**

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

Fuente: Ramírez, J., et. al. (2004). Depolimerización de polietilentereftalato (PET) como alternativa de reciclado. Colombia, p. 27

### 3.2.5 Propiedades térmicas

La temperatura de transición vítrea ( $T_G$ ) puede cambiar debido a las variaciones de los contenidos de humedad del poliedro. Un aumento de humedad reduce el valor de  $T_G$ .

**CUADRO N° 3.6**  
**PROPIEDADES TÉRMICAS DEL PET**

<b>PROPIEDAD</b>	<b>VALOR</b>
Conductividad Térmica a 23°C (W/m.K)	0.15 - 0.4
Dilatación térmica (x 10 <sup>-6</sup> /K)	20 - 80
Temperatura máxima de utilización (°C)	115 - 170
Temperatura mínima de utilización (°C)	-40 a -60
Temperatura de deflexión en caliente - 0.45MPa (°C)	115
Temperatura de deflexión en caliente - 1.8MPa (°C)	80

Fuente: Ramírez, J., et. al. (2004). "Depolimerización de polietilentereftalato (PET) como alternativa de reciclado". Colombia. p. 27

### **3.2.6 Propiedades mecánicas**

**CUADRO N° 3.7**  
**PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PET**

<b>PROPIEDAD</b>	<b>VALOR</b>
Coefficiente de fricción	0.2 - 0.4
Dureza - Rockwell	M 94 - 101
Módulo de tracción (Gpa)	2 - 4
Resistencia a la tracción (MPa)	190 - 260
Resistencia al impacto Izod (J/m)	13 - 35

Fuente: Ramírez, J., et. al. (2004). "Depolimerización de polietilentereftalato (PET) como alternativa de reciclado". Colombia. p. 28

### **3.2.7 Propiedades ópticas**

Dependiendo de su estructura, parcialmente cristalina o amorfa se presentan diferentes rangos de transparencia y permeabilidad a la luz. En general, posee una permeabilidad a la luz en el rango del 80% – 90% (Ramírez, 2004).

### **3.3 Usos y Aplicaciones**

El PET se utiliza para una gran diversidad de aplicaciones, entre las que destacan las que figuran a continuación:

Botellas de bebidas en general, tanto carbonatadas como sin gas.

Botellas de aceites y envases de mayonesas y salsas.

Envases de productos cosméticos.

Fibras para textiles.

Enseres para microondas y láminas para hornos.

Cintas de vídeo y audio.

Películas radiográficas.

Debido a la gran variedad de usos del PET y el incremento de la producción de envases y botellas con este polímero, se plantea el reciclaje químico vía depolimerización por glicólisis para el tratamiento de los mismos, en el capítulo 8.

### **3.4 Tecnologías de reciclaje**

Existen diversos métodos en el tratamiento del reciclado de los plásticos, denominados: Primario, secundario, terciario y cuaternario.

El tratamiento primario consiste en operaciones mecánicas para obtener un producto de similares características que el producto original. Este reciclado se aplica para el aprovechamiento de recortes de las plantas de producción y transformación, y corresponde a un porcentaje muy reducido de los denominados residuos plásticos.

En el tratamiento secundario, consistente en la fusión, los desechos son convertidos en productos de diferentes formas y con mayor espectro de aplicaciones, las cuales son diferentes a las del plástico original, en un proceso evolutivo "en cascada" hacia prestaciones inferiores.

Esta es la tecnología más usada hasta ahora, particularmente en la industria del automóvil, y se estima en sólo el 20% los plásticos que pueden ser reciclados de esta forma (López, 2006).

El reciclado terciario, o "reciclado químico", persigue el aprovechamiento integral de los elementos constitutivos del plástico, por transformación del mismo en hidrocarburos, los cuales pueden ser materias primas integrables bien nuevamente en la ruta de obtención de plásticos o en

otras rutas de la industria petroquímica. Los métodos pueden ser químicos o térmicos, dependiendo del tipo de polímero.

El reciclado cuaternario consiste en la incineración para recuperar energía. Actualmente es muy contestado socialmente por los problemas medioambientales.

La ruta química de reciclado terciario es la solvólisis o descomposición química, la cual se puede realizar por diferentes vías: metanólisis, glicólisis, hidrólisis y aminólisis.

La solvólisis, o descomposición química, ruta más desarrollada industrialmente que la térmica, es aplicable solamente a polímeros de condensación (poliésteres, nylon y poliuretanos), los cuales tienen grupos funcionales unidos por enlaces débiles que son susceptibles de disociación por ataque con determinados agentes químicos. Según el agente utilizado las vías de tratamiento son: Metanólisis, glicólisis e hidrólisis.

Es de destacar que los procesos de metanólisis (con metanol) y glicólisis (con etilenglicol) eliminan impurezas de los plásticos y los compuestos obtenidos se pueden dedicar a la fabricación de artículos con restricciones de calidad como los de envasado de alimentos.

En USA hay varias plantas de reciclado por metanólisis y glicólisis. Du Pont de Nemours, Eastman Kodak y Goodyear han perfeccionado la recuperación de politereftalato de etileno (PET) para obtener tereftalato de dimetilo (DMT) y etilenglicol (EG). En Francia, Technochim obtiene ácido tereftálico por saponificación de PET. En Alemania, la Hoesch está trabajando para reciclar poliacetal, usado en los coches y accesorios eléctricos. Se recuperan los monómeros, trioxano y formaldehído, tratando el plástico con un ácido mineral fuerte.

El método termolítico de descomposición es necesario para la rotura de las cadenas de los polímeros de adición como los vinílicos, acrílicos fluoroplásticos y poliolefinas. Este método tiene mayor diversidad y flexibilidad que la solvólisis en tanto que comprende tratamientos a altas temperaturas como la pirólisis y gasificación y otros procesos que son habituales en refinería, generalmente con intervención de catalizadores sólidos:



Craqueo térmico, hidrogenación catalítica y craqueo catalítico. Los polímeros son convertidos a monómero, a combustibles gaseosos y líquidos, y a compuestos de base en la petroquímica.

Algunas opciones de descomposición térmica tienen la ventaja de disponer parcialmente de infraestructura en las refinerías con tecnologías contrastadas. Los inconvenientes se centran en: 1) El coste de la necesaria separación y clasificación de plásticos. 2) La alimentación al equipo de tratamiento, preferiblemente en una corriente fluida. 3) La eliminación de contaminantes como el cloro y el nitrógeno. Estando resueltos los mayores problemas tecnológicos de estos métodos, el reto es hacer interesante la economía de estos tratamientos, cuya competitividad dependerá siempre del precio del barril de petróleo.

La hidrogenación catalítica es una vía más avanzada comercialmente. La planta de Veba Oel en Alemania procesa 400 Tm/año de plásticos (acepta hasta un 10 % de PVC). Opera a 150-300 bar y 470 °C en atmósfera de hidrógeno, dando un producto con un 60% de parafinas, 30% de nafta, 9% de aromáticos y 1% de olefinas. La rentabilidad de la planta exige una tasa de 120 USD/Tm de plástico tratado. BP Petrochemical está creando un consorcio para comercializar un proceso de hidrogenación catalítica y han hecho ensayos con poliolefinas. Para ser rentables se necesitaba una subvención de 15-150 USD/Tm (López, 2006).

## **CAPÍTULO IV**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **4.1 Catálisis Molecular**

Son sistemas donde la identidad molecular de las especies es catalíticamente organizada. Muchos catalizadores moleculares son usados en reacciones homogéneas, pero también pueden ser usados en sistemas heterogéneos, como los que tienen lugar en las organizaciones moleculares para la formación de polímeros.

Los tres criterios predominantes para desarrollar y diseñar nuevos materiales catalíticos (Van Santen y Neurock, 2006) son:

- Altamente activos.
- Producen sólo los productos deseados.
- Mantienen su actividad para prolongados períodos de tiempo.

Estos tres factores son controlados por la cinética de los pasos elementales que tienen lugar en todo el ciclo catalítico. La actividad es definida como la tasa con la que se lleva a cabo todo el ciclo catalítico y es definida por los límites de conversión en cada paso de todo el proceso.

Estos pasos pueden incluir adsorción, desorción, reacciones específicas superficiales y difusión superficial. La selectividad de la reacción es definida como un porcentaje de las moléculas del producto deseado que forman parte del espectro del producto. Un 100% de selectividad es siempre deseada, pero nunca totalmente alcanzada. El tiempo de vida del catalizador es relacionado a la selectividad hacia productos que envenenan el catalizador.

La reactividad catalítica es controlada por la combinación de la reactividad química intrínseca y los efectos extrínsecos de transferencia de masa y calor relacionados a la morfología del catalizador y la configuración del reactor. La cinética del sistema catalítico es determinada por la naturaleza del complejo químico formado como

resultado de las interacciones entre átomos del catalizador y el adsorbato.

La segunda importante condición se refiere al rango de las interacciones químicas. Es ahora bien conocido que la naturaleza del ambiente de la reacción acerca de los sitios catalíticos activos puede ser tan importante en la descripción y control del rendimiento del catalizador como las interacciones químicas intrínsecas en el complejo catalítico. El ambiente de la reacción incluye la influencia del medio solvente, matriz del estado sólido, el largo alcance de las fuerzas electrostáticas entre el catalizador y el complejo reactivo, apaciguamiento y reconstrucción de la superficie, promoción e interacciones laterales entre las superficies del adsorbato que cambian con las condiciones de la reacción.

La tercera importante condición se refiere a si los sitios activos y el ambiente de la reacción pueden tratarse estáticamente o si se debe seguir su dinámica. Los efectos físicos interesantes y sus fenómenos pueden provenir del acoplamiento de la superficie móvil con la reactividad química intrínseca que incluye oscilaciones cinéticas y reorganizaciones en la formación bajo condiciones catalíticas particulares.

La catálisis molecular puede presentarse en varios tipos de reacciones: (1) reacciones gas-fluido; (2) catálisis ácido-base y (3) catálisis organometálica. De acuerdo al tema de estudio de este trabajo, se describirán la catálisis ácido-base y la catálisis organometálica (Missen, Mims y Saville, 1999).

#### **4.1.1 Catálisis ácido – base**

En soluciones acuosas, las velocidades de muchas reacciones depende de la concentración del ion hidrógeno ( $H^+$  ó  $H_3O^+$ ) y/o de la concentración del ion hidróxilo ( $OH^-$ ). Si usamos el concepto de Browsted de ácido como un donador de protones y base como un receptor de protones, la consideración de catálisis ácido base puede ser extendida a otros solventes diferentes al

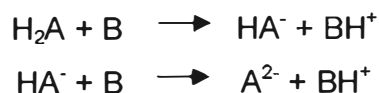
agua. Un ácido, o donador de protones, se convierte en su base conjugada; y una base, o aceptor de protones, se convierte en su ácido conjugado:



Para la transferencia de un protón entre un ácido monoprótico HA y una base B,



Y para un ácido diprótico,



La catálisis ácido-base puede ser considerada dentro de dos categorías: (1) catálisis específica ácido-base, y (2) catálisis general ácido-base.

### **Catálisis Específica Ácido – Base**

En la catálisis específica ácido – base de sistemas acuosos (Missen, et. al., 1999), la velocidad constante observada,  $K_{obs}$ , depende de las concentraciones  $[\text{H}^+]$  y/o  $[\text{OH}^-]$ , pero no de las concentraciones de otros ácidos o bases presentes:

$$k_{obs} = k_o + k_{H^+}[\text{H}^+] + k_{OH^-}[\text{OH}^-] \quad \dots(4.1)$$

Donde  $k_o$  es la velocidad constante a concentraciones suficientemente bajas de  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$ ,  $k_{H^+}$  es la velocidad constante catalítica hidrógeno-ion, y  $k_{OH^-}$  es la velocidad constante catalítica hidróxilo-ion. Si sólo el término  $k_{H^+}[\text{H}^+]$  es importante, se tiene una catálisis específica hidrógeno-ion, recíprocamente para

el término  $k_{OH^-}[OH^-]$ . De la constante ion-producto del agua (solvente),  $k_w = [H^+][OH^-]$ ; con lo que:

$$k_{obs} = k_o + k_{H^+}[H^+] + k_{OH^-} \frac{k_w}{[H^+]} \quad \dots(4.2)$$

Si sólo uno de los términos de las ecuaciones anteriores predomina en una región particular de pH, varios casos pueden aparecer, los que pueden ser caracterizados o detectados si la ecuación anterior es llevada a su forma logarítmica:

$$\log_{10} k_{obs} = (\text{constante}) \pm \log_{10} [H^+] = (\text{constante}) \pm pH \quad \dots(4.3)$$

En la ecuación anterior, la pendiente negativa con respecto al pH se refiere a la catálisis específica hidrógeno-ion y la pendiente positiva se refiere a la catálisis específica hidróxilo-ion; si  $k_o$  es el término predominante, la pendiente es cero.

### Catálisis General Ácido – Base

En la catálisis general ácido – base (Missen, et. al., 1999), la velocidad constante observada depende de las concentraciones de todos los ácidos y bases presentes. Esto es, de todo el sistema acuoso,

$$k_{obs} = k_o + k_{H^+}[H^+] + k_{OH^-}[OH^-] + \sum k_{HA}[HA] + \sum k_{A^-}[A^-] \quad \dots(4.4)$$

La variación sistemática de las concentraciones  $[H^+]$ ,  $[OH^-]$ , etc., permite la determinación experimental de cada constante de velocidad. Si los términos en la primera sumatoria del lado derecho de la ecuación anterior predominan, por lo general tendremos una catálisis ácida general; si predomina la segunda parte de la sumatoria, tendremos una catálisis básica general.

El mecanismo en la sección previa con un ácido simple puede ser usado para mostrar las características de la catálisis ácida general, si el segundo paso no es determinante en la velocidad sino que se abstiene, y el primer paso no establece rápidamente el equilibrio, sino que implica una desaceleración en el paso (determinación de la velocidad) hacia la dirección correcta caracterizada por la constante de reacción  $k_{HA}$ , entonces:

$$(-r_S) = k_{HA}[HA][S] \equiv k_{obs}[S] \quad \dots(4.5)$$

Con lo que se obtiene el siguiente resultado:

$$k_{obs} = \sum k_{HA}[HA] \quad \dots(4.6)$$

si hay más de un ácido presente como catalizador, correspondiendo a la primera sumatoria de la ecuación 4.4.

### Ácidos de Lewis

Por definición, un ácido de Lewis es un aceptor de electrones, capaz de recibirlos de una base de Lewis para conformar un aducto ácido-base.

Muchos metales, fundamentalmente metales de transición, se consideran ácidos de Lewis y se utilizan como tales en diferentes reacciones. Entre ellos cabe destacar (Mosser y Slocum, 1992):

Aluminio, Antimonio, Azufre, Boro, Cerio, Cobalto, Cobre, Estaño, Europio, Fósforo, Germanio, Hafnio, Hierro, Lantano, Litio, Magnesio, Molibdeno, Níquel, Paladio, Plata, Silicio, Talio, Titanio, Vanadio, Iterbio, Zinc, Zirconio.

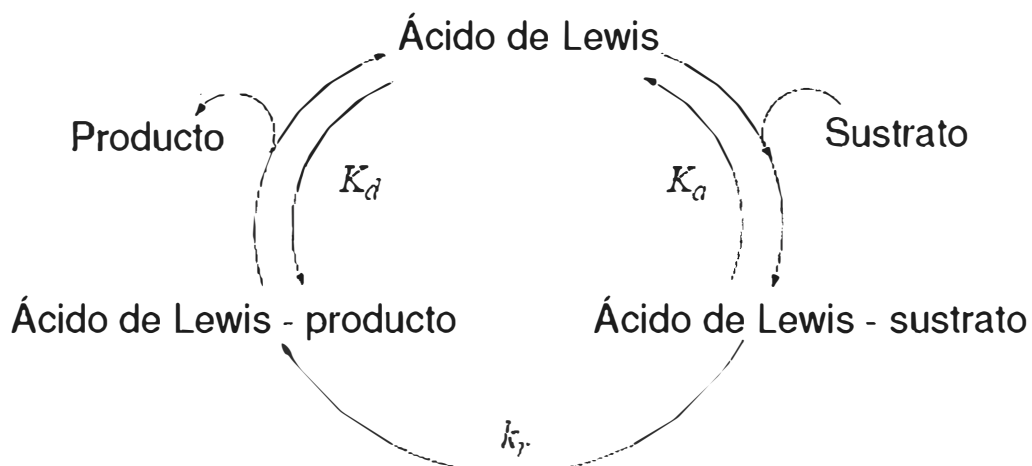
Distintos compuestos de los mencionados metales se utilizan como catalizadores ácidos de Lewis en reacciones de síntesis orgánica, destacando entre ellos  $BF_3$ ,  $AlCl_3$ ,  $SnCl_4$ ,  $AcZn$  o  $TiCl_4$ . Estos reactivos clásicos activan los grupos funcionales de

los sustratos con relativamente baja estéreo-, regio-, y quimioselectividad. Sin embargo, la acidez de Lewis de estos metales puede ser modulada cuando se coordinan con diferentes ligandos orgánicos.

En general, todos los ácidos de Lewis se caracterizan por poseer una fuerte afinidad por varios heteroátomos presentes en moléculas orgánicas, particularmente nitrógeno y oxígeno (oxígeno-filicidad), por lo que son capaces de generar complejos de coordinación 1:1, donde el sustrato orgánico se comporta como una base de Lewis (Yamamoto, 1999). La coordinación del ácido de Lewis induce la polarización de la molécula reactante como consecuencia de la pérdida de densidad electrónica del reactivo en beneficio del catalizador, activando la primera y produciendo la reacción química y el producto deseado.

En una etapa final, el complejo (ácido de Lewis-producto) se disocia, regenerando el centro ácido para otro ciclo catalítico. La eficiencia catalítica del proceso estará determinada por cada una de estas etapas que pueden ser dimensionadas mediante las respectivas constantes,  $K_a$ ,  $k_r$  y  $K_d$  (Figura N° 4.1).

**FIGURA N° 4.1  
CONSTANTES DE REACCIÓN**



Fuente: Moser, W. R., et. al. (1992). "Reacciones homogéneas catalizadas por metales de transición", p.138

En la figura N° 4.1 se muestra el esquema del proceso catalizado por un ácido de Lewis. Donde:  $K_a$  es la constante de asociación ácido de Lewis – sustrato,  $K_d$  es la constante de disociación ácido de Lewis – producto, y  $k_r$  es la constante de velocidad de la reacción química.

Con el fin de explicar la actividad catalítica de los ácidos de Lewis (Moser, et. al., 1992) se puede hacer uso de dos conceptos: fuerza ácida y dureza-blandura del centro ácido. El primer concepto, fuerza ácida, se relaciona de manera intuitiva con las interacciones coulómbicas entre el catalizador y el sustrato, mientras que el segundo concepto, dureza-blandura, estaría más relacionado con las interacciones covalentes asociadas a los procesos de recubrimiento orbital entre los orbitales frontera.

Los ácidos y bases duros son, por lo general, átomos o moléculas pequeñas y no muy polarizables con cargas altamente localizadas. Por otro lado, ácidos y bases blandas son átomos o moléculas fácilmente polarizables con cargas deslocalizadas. Una selección de especies ácidos de Lewis ordenados de acuerdo a su fortaleza ácida en solución acuosa se presenta en la figura N° 4.2.

**FIGURA N° 4.2**  
**CLASIFICACIÓN DE ALGUNOS ÁCIDOS DE LEWIS DE**  
**ACUERDO A SU DUREZA-BLANDURA EN SOLUCIÓN ACUOSA**

Duros	Intermedios	Blandos
H <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cu <sup>+</sup>
Fe <sup>3+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Hg <sup>2+</sup>
Co <sup>3+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>
Al <sup>3+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	
La <sup>3+</sup>		

Fuente: Moser, W. R., et. al. (1992). "Reacciones homogéneas catalizadas por metales de transición", p.139



De esta manera, la teoría predice altas estabilidades para productos formados entre un ácido duro y una base dura, fundamentalmente por el resultado de interacciones electrostáticas, y entre ácido blando y base blanda, donde los enlaces covalentes pueden llegar a ser importantes. Los complejos formados por ácido duro – base blanda o viceversa, tienen usualmente escasa estabilidad. En términos cuantitativos, cuando se utiliza el concepto de dureza y blandura para predecir reactividades entre especies con dureza y blandura intermedias los resultados pueden no ser satisfactorios. El problema se complica todavía más cuando se utilizan disolventes que influyen sobre la reactividad del sistema (Mosser, et. al., 1992).

Los solventes más frecuentes en la catálisis vía ácidos de Lewis son apróticos y apolares, como por ejemplo diclorometano o benceno (Missen, et. al., 1999). Los procesos catalizados por ácidos de Lewis con agua como disolvente son poco comunes, si bien actualmente la tendencia se está revirtiendo debido al éxito conseguido con algunos de ellos, que han encontrado incluso aplicación industrial.

#### **4.1.2 Catalizadores y Tipos de catalizadores**

Muchas reacciones ocurren mucho más rápido en presencia de una sustancia que no es un producto (o reactante) en el sentido usual. La sustancia es llamada catalizador, y el proceso en el cual se incrementa la velocidad de reacción, catálisis.

Los siguientes puntos muestran la naturaleza cualitativa y los conceptos de catálisis y catalizadores:

- (1) La característica primaria es que los catalizadores incrementan la velocidad de reacción, en comparación con la reacción no catalizada.
- (2) El catalizador no aparece en la descripción estequiométrica de la reacción, aunque si aparece directa o indirectamente en la ley de reacción y en el mecanismo.

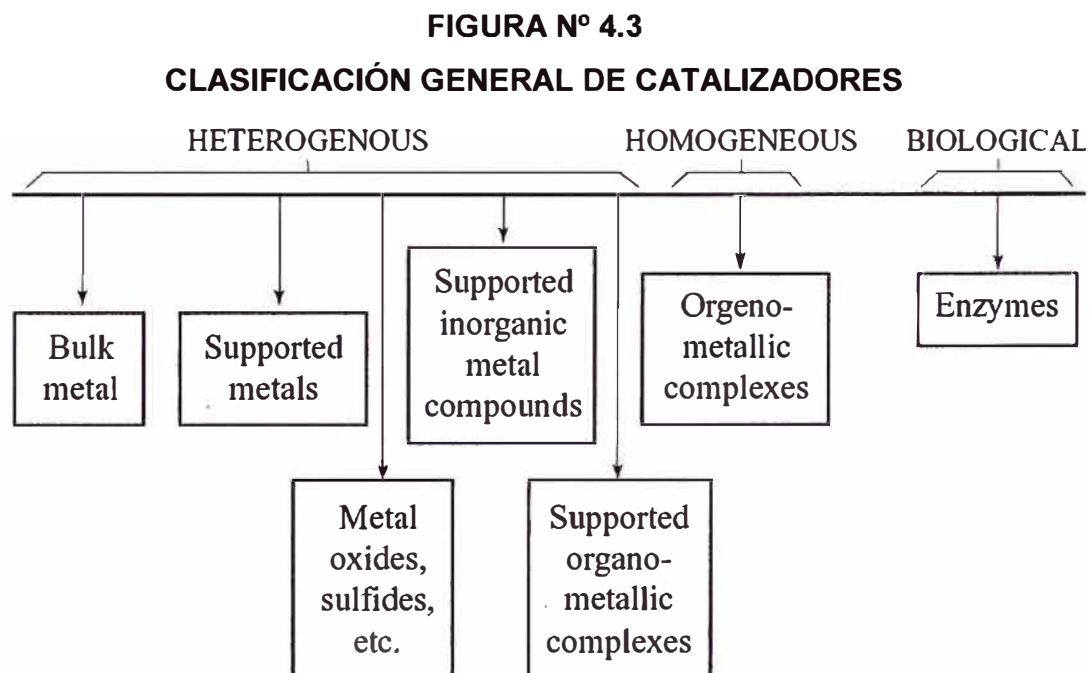
- (3) La cantidad de catalizador no es alterado por el avance de la reacción, aunque puede experimentar cambios en sus propiedades.
- (4) El catalizador no altera la naturaleza química de los productos. Puede ser usado cuando ocurre más de una reacción (más de un producto), debido a que el catalizador afecta la selectividad de la reacción.
- (5) De acuerdo a (4), el catalizador no afecta la afinidad termodinámica que tiene lugar en la reacción. Esto es, afecta la velocidad, pero no la tendencia con que ocurre la reacción. No afecta la variación de la energía libre o la constante de equilibrio de la reacción.
- (6) Debido a que el catalizador acelera la llegada al equilibrio, del mismo modo puede acelerar la reacción en sentido contrario.
- (7) Aunque es correcto decir que el catalizador no es implicado en la estequiometría o termodinámica de la reacción, si lo es en el mecanismo de la reacción. En el aumento de la velocidad de reacción, el catalizador actúa proporcionando un camino fácil para el avance de la misma, que generalmente consiste en la formación de productos intermedios entre el catalizador y el reactante, seguido por la aparición del producto, o productos, y la regeneración del catalizador. El camino fácil de reacción es usualmente asociado con una baja energía de activación.

La catálisis es un tipo especial del mecanismo de reacción de secuencia cerrada. En este sentido, un catalizador es una especie que participa en los pasos del mecanismo de reacción, pero que es regenerada después de la formación del producto para participar en otro ciclo catalítico. El mecanismo de reacción catalítica requiere cuatro de pasos: tres bimoleculares y un unimolecular.

Una cantidad de catalizador relativamente pequeña puede causar la conversión de una gran cantidad de reactante. Sin

embargo, la idea de que una pequeña cantidad de catalizador puede causar un alto grado de reacción, no significa que la concentración de catalizador no sea importante. De hecho, cuando la reacción no involucra un mecanismo de cadena, su velocidad suele ser proporcional a la concentración de catalizador. Aunque no siempre existe una proporcionalidad simple en las reacciones con catalizadores sólidos, en las catálisis homogéneas por lo general prevalece una proporcionalidad directa entre la velocidad y la concentración del catalizador.

Se tiene una variedad de catalizadores heterogéneos, naturales o fabricados de diferentes tipos y formas. En general, pueden ser heterogéneos, homogéneos y biológicos. Esta es una clasificación somera y arbitraria, pero sirve para considerar la variedad existente de tipos de catalizadores. Esta variedad se muestra en la figura N° 4.3.



Fuente: Smith, Gerard, et. al. (2000). "Catálisis heterogénea en química orgánica". p.3

### **Formas de catalizadores heterogéneos**

Los catalizadores heterogéneos pueden venir en formas diferentes dependiendo de su aplicación. Se pueden mencionar diferentes categorías (Smith y Notheisz, 2000):

- **Metales puros**

Metales en coloides, esponjas metálicas, estructura metálica, polvos metálicos, láminas metálicas, láminas electrodepositadas, alambres, hojas finas metálicas, gasas metálicas.

- **Compuestos metálicos**

Óxidos metálicos, sulfuros metálicos, carburos metálicos, boros metálicos, aleaciones metálicas, vidrios metálicos, mallas moleculares, sales, ácidos.

- **Soportes**

Alta área superficial ( $>1\text{m}^2/\text{g}$ )

Porosos: arcillas naturales, alumina, magnesio, carbón activado, sílica, asbestos.

No porosos: Sílice-alumina, carbón negro, titânio, óxido de zinc.

Baja área superficial ( $<1\text{m}^2/\text{g}$ )

Porosos: harina fósil, piedra pómez.

No porosos: cristal molido, "alundum", carburos de silicio.

- **Soportes de compuestos metálicos**

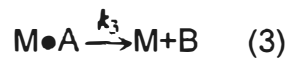
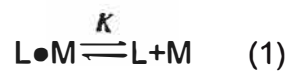
Pellets, gránulos, monolitos y de formas especiales.

#### **4.1.3 Catálisis organometálica**

Muchos procesos catalíticos usan catalizadores organometálicos, que consisten en un centro atómico metálico que es rodeado por una variedad de ligandos. Estos catalizadores tienen la ventaja de ser identificables; catalizadores moleculares idénticos y las estructuras de los sitios catalíticos pueden ser alterados por el uso específico de ligandos para cambiar su actividad o selectividad. Con la adición de ligandos

específicos, es posible que tengan lugar reacciones estereoselectivas. Estas características son extensivas en la aplicación de polimerización por catálisis, donde las propiedades del polímero dependen de la estereoquímica (Missen, et. al., 1999).

La cinética de la reacción que involucra cada catalizador puede ser demostrada por el siguiente mecanismo.



Aquí, L es un ligando móvil que puede dejar el sitio del metal (M) abriéndose brevemente para una reacción con A en el paso inicial del ciclo catalítico. La transformación del complejo M•A en los productos completa el ciclo. El equilibrio en el paso (1) se mantiene a la izquierda en muchos casos, debido a que los ligandos protegen al centro metálico por aglomeración. Así, la concentración de M es muy pequeña, y la concentración total del catalizador es  $C_{Mt} = C_{M \bullet A} + C_{M \bullet L}$ . La ley de reacción que gobierna para este mecanismo es:

$$(-r_A) = \frac{k_2 k_3 K \cdot c_A \cdot c_{Mt}}{k_3 c_L + k_2 K \cdot c_A} \quad \dots(4.7)$$

La tasa es proporcional a la cantidad de catalizador. Si el paso (2) de la reacción es lento ( $k_2$  es pequeño y el primer término del denominador de la ecuación 4.7 es dominante, la expresión se reduce a:

$$(-r_A) = \left( \frac{k_2 K \cdot c_{Mt}}{c_L} \right) \cdot c_A \quad \dots(4.8)$$

En este límite, la reacción es de primer orden respecto a A, y la mayoría del catalizador está en la forma de M•L. Nótese la inhibición por el ligando. Si el paso de reacción (3) es lento ( $k_3$  es pequeño), la expresión se simplifica a:

$$(-r_A) = k_3 \cdot c_{Mf} \quad \dots(4.9)$$

En este caso, casi todo el catalizador está en la forma M•A y la reacción es de orden cero con respecto a A.

La catálisis homogénea es altamente selectiva y activa en la síntesis de químicos finos a escala industrial. En comparación con la catálisis heterogénea, la catálisis homogénea se lleva a cabo a condiciones de reacción relativamente suaves. Más aún, la selectividad de la reacción deseada puede ser ajustada con respecto a un diseño especial de ligando. El principal inconveniente de los procesos catalíticos homogéneos es el alto costo de los precursores metálicos y la síntesis de los ligandos. La principal recuperación del catalizador en el diseño de la planta incluye, por ejemplo, columnas de destilación para la recuperación del catalizador que suelen ser muy complejas. De lo anterior, los procesos homogéneos catalizados son comúnmente factibles en la síntesis de químicos finos, mientras que los químicos gruesos son principalmente producidos por catálisis heterogénea (Van Santen, et. al., 2006).

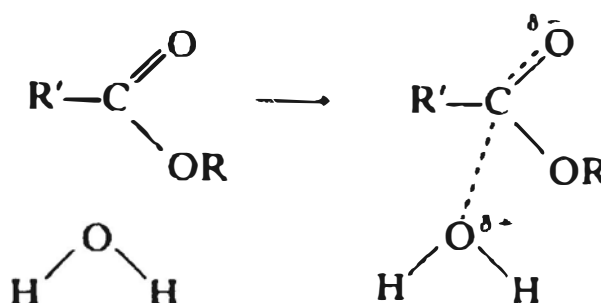
#### **4.2 Mecanismos de Catálisis en Fase Acuosa**

Una gran variedad de reacciones catalíticas que ocurren en fase líquida o acuosa presentan marcados cambios en la actividad y/o selectividad sobre las mismas reacciones si éstas se llevaran a cabo en fase vapor. La tasa de reacción puede ser reducida debido a la disponibilidad del reactante en la superficie del catalizador como resultado de transferencias externas de masa o limitaciones de solubilidad. La fase de la solución también puede participar en la alteración de la cinética

intrínseca asociada con la adsorción elemental, reacción superficial, difusión superficial y procesos de desorción. Está bien establecido en la química orgánica que la fase de la solución puede influenciar una reacción sea estabilizando o desestabilizando las etapas de transición y los productos sobre ese estado reactante (Van Santen, et. al., 2006).

Son muy numerosas las reacciones químicas inorgánicas y orgánicas en solución en las que se ha comprobado que determinadas especies, también disueltas en el mismo sistema homogéneo en que ocurre la reacción, pueden contribuir a incrementar de forma notable su velocidad, a consecuencia de un típico proceso de catálisis homogénea. El ataque no catalizado del agua sobre un éster conduce al estado de transición en el que se forma una carga positiva en la molécula de agua atacante y una carga negativa sobre el oxígeno carbonílico.

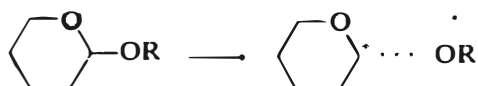
**FIGURA N° 4.4**  
**ATAQUE NO CATALIZADO DEL AGUA SOBRE UN ÉSTER**



Fuente: Fersht, Alan. (1980). "Estructura y mecanismo de los enzimas". p.37

La hidrólisis no catalizada de un acetal implica un estado de transición de estructura parecida a un ion carbonio y a un alcóxido.

**FIGURA N° 4.5**  
**HIDRÓLISIS NO CATALIZADA DE UN ACETAL**

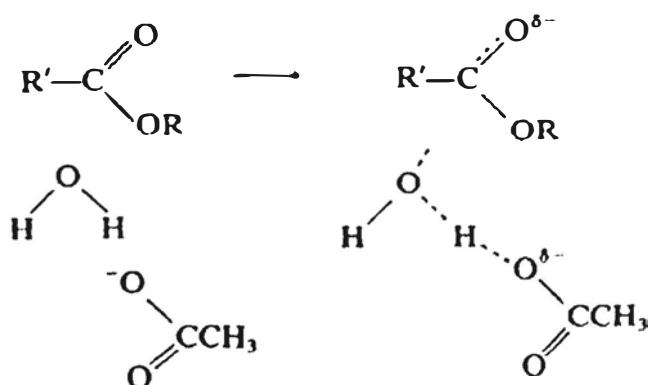


Fuente: Fersht, Alan. (1980). "Estructura y mecanismo de los enzimas". p.37

En ambas reacciones el estado de transición está muy desfavorecido debido a las cargas positiva y negativa inestables que se han formado. La estabilización de estas cargas cataliza la reacción al rebajar la energía del estado de transición. Esto puede llevarse a cabo en el caso de la carga positiva que aparece en la molécula del agua atacante transfiriendo uno de los protones a la base durante la reacción. Esto se conoce como catálisis básica general.

De forma parecida, la carga negativa aparecida sobre el alcohol expelida del acetal puede estabilizarse por transferencia de protón desde un ácido, lo que se conoce como catálisis ácida general.

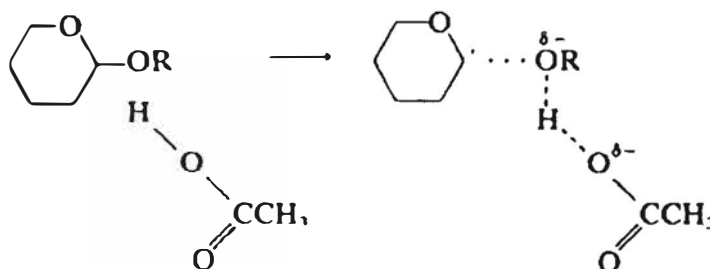
**FIGURA N° 4.6**  
**CATÁLISIS BÁSICA GENERAL POR EL ION ACETATO**



Fuente: Fersht, Alan. (1980). "Estructura y mecanismo de los enzimas". p.37



FIGURA Nº 4.7  
CATÁLISIS ÁCIDA GENERAL POR EL ÁCIDO ACÉTICO



Fuente: Fersht, Alan. (1980). "Estructura y mecanismo de los enzimas". p.38

Esta catálisis ácido-básica se denomina general para distinguirla de la catálisis ácida o básica específica en la que el catalizador es el protón o el ion hidróxilo.

Las cargas positivas y negativas también pueden estabilizarse mediante catálisis electrostática. El ion carbonio cargado positivamente no puede estabilizarse por catálisis básica general ya que no se ioniza, pero sin embargo, puede ser estabilizado por el campo eléctrico de un ion carboxilato cargado negativamente. La carga negativa de un oxianion puede ser estabilizada también por un ion metálico cargado positivamente, tal como el  $Zn^{2+}$  o el  $Mg^{2+}$ . La estabilización d una carga negativa, es decir, un electrón, se conoce como catálisis electrofílica (Fersht, 1980).

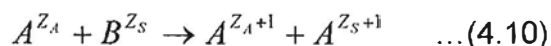
Los tipos de catálisis mencionados funcionan por estabilización del estado de transición de la reacción sin cambiar el mecanismo. La catálisis puede implicar también un camino de reacción diferente. Un ejemplo típico es la catálisis nucleofílica en una reacción de transferencia de acilo o en una reacción hidrolítica.

Para que la catálisis nucleofílica sea eficiente el nucleófilo se debe ser más nucleófilo que aquel al cual reemplaza, y el intermedio debe ser más reactivo que el compuesto original.

La catálisis nucleofílica es un ejemplo específico de catálisis covalente: el sustrato es modificado transitoriamente por formación de un enlace covalente con el catalizador para dar un intermedio reactivo. También

existen muchos ejemplos de catálisis electrofílica por modificación covalente.

Las reacciones de transferencia de carga entre iones, debida a los electrones, que corresponden a estequiometrías del tipo



considerando los posibles tipos de mecanismos que pueden presentarse, según evolucionen a través de complejos de esfera interna o externa, en los que juegan importante papel las moléculas del solvente que forman las esferas de solvatación e incluso otras especies iónicas presentes en el sistema. En estas circunstancias, es posible la participación de especies iónicas determinadas, distintas de reactivos o productos, que actúen como catalizadores favoreciendo la evolución de la reacción. Normalmente se trata de iones de un elemento, que puede presentar distintos grados de oxidación, algunos de los cuales pueden ser inestables o poco estables en el seno de la solución y en las condiciones en que transcurre la reacción.

En resumen, los procesos de catálisis homogénea en solución pueden corresponder a uno de los cuatro tipos característicos siguientes.

- **Catálisis por transferencia de electrones:** En ella los catalizadores son generalmente especies iónicas que corresponden a alguno de los diversos grados de oxidación de un determinado elemento.
- **Catálisis específica ácido-base.** En ella los catalizadores son propiamente los iones H<sup>+</sup> u OH<sup>-</sup>, procedentes de la ionización de ácidos y bases, sin que los respectivos aniones de estos ácidos o los cationes de estas bases presenten capacidad catalítica.
- **Catálisis general ácido-base.** Es la producida por procesos de transferencia de protones entre los catalizadores que se han de considerar como ácidos o bases de Brönsted, frente al sustrato que tiene carácter de base o de ácido de Brönsted.
- **Catálisis electrofílica y nucleofílica.** Es la producida mediante procesos de formación de uniones dativas, cuando los catalizadores tienen el carácter de bases o, a veces, de ácidos de Lewis, y las

moléculas del sustrato actúan como ácidos o bases de Lewis. Dentro de este tipo de catálisis se debe incluir la que producen ciertos iones metálicos con capacidad para formar complejos con las moléculas del sustrato, que actúan de ligandos, o la catálisis debida a ciertas moléculas con defecto o exceso de electrones, capacitadas también para formar enlaces de estos tipos.

#### **4.3 Reciclaje Químico Vía Depolimerización Química**

Existen dos soluciones generales para cuando un producto se convierte en residuo: a) tirarlo a un vertedero, b) recuperarlo. Los plásticos no se degradan en el medioambiente como la basura ecológica (exceptuando el caso de los plásticos biodegradables), la primera opción no es ecológicamente muy aceptable. Sí, en cambio, la recuperación. Se trata de un amplio concepto que engloba en sí a otros dos: a) reutilización, b) reciclaje. El que más interés acapara es sin lugar a dudas el primero de ellos, tanto ecológica como económicamente, debido a que requiere mínimos recursos y el menor desgaste del valor del producto. Sin embargo, la normativa legal, la salubridad y la degradación del producto no siempre posibilitan recurrir a la reutilización, con lo cual la única alternativa posible para esta serie de supuestos es la del reciclaje, que, en cualquier caso, nunca será el último fin, sino una vía para alcanzar otra serie de objetivos. Si lo que se pretende es disminuir la cantidad de residuos y el consumo de materias primas, el reciclaje siempre resultará rentable; si se persigue reducir el consumo energético, la energía necesaria para el reciclaje deberá ser inferior a la que se requiera para fabricar la materia prima.

Desde el punto de vista ambiental, el PET es un polímero plástico con buenas aptitudes para el reciclado. El principal destino de esta materia prima post-consumo es la fabricación de fibras textiles, utilizándose en la confección de alfombras, cuerdas, cepillos, escobas, telas para prendas de vestir como el "polar", calzados, camisetas, artículos de escritorio, artículos de limpieza, etc. Para la fabricación de los productos citados basta con reciclar el PET mecánicamente, pero en el momento en que se desea la fabricación de artículos de calidad similar a la de

PET virgen o nuevos envases para bebidas o alimentos, se hace necesario el reciclado químico. Esto es porque el reciclado químico presenta una mayor calidad frente al reciclado mecánico, pudiendo por tanto reciclarse químicamente residuos de PET de cualquier tipo, mientras que mecánicamente se observan una serie de restricciones según la calidad deseada, siendo la consideración más óptima para este tipo de reciclado la de reciclar PET transparente y en condiciones de gran limpieza, hecho que suele darse únicamente de forma generalizada en las botellas de bebidas (López, 2006).

Las técnicas de reciclado del PET post-consumo son fundamentalmente tres: reciclado mecánico, reciclado químico y valorización energética.

El reciclaje químico de PET incluye desde una parcial hasta una completa depolimerización. La síntesis del PET es una policondensación reversible. Por ello, la adición de un producto de condensación para el polímero presiona la reacción en la dirección inversa, favoreciendo la formación de monómeros y oligómeros de bajo peso molecular (Patterson, 2007).

Los métodos de depolimerización tradicionales empleados en el reciclaje químico del PET son hidrólisis, metanólisis y glicólisis en agua, metanol y etilenglicol, respectivamente, que son los productos de condensación agregados para llevar a cabo la depolimerización.

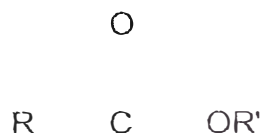
Comparando los tres agentes de depolimerización, tanto el metanol y el etilenglicol son ácidos más débiles que el agua, con valores de constante de disociación ácida ( $pK_a$ ) de 15.5 y 14.24, respectivamente, comparados con el valor de  $pK_w$  del agua 14.0 (a 25°C). El orden de la nucleofilidad es inversamente proporcional a la fuerza del ácido, sugiriendo que de los tres agentes depolimerizantes, el agua es el nucleófilo más débil. Ciertamente, la reacción de hidrólisis es lenta en comparación con las reacciones de metanólisis y glicólisis. Un inconveniente más de la hidrólisis es la recuperación del monómero del ácido tereftálico, que normalmente requiere muchos pasos para lograr la pureza requerida. La depolimerización hecha vía metanólisis también implica un alto costo de separación y purificación de monómeros, haciendo el proceso poco atractivo económicamente. Usualmente, la

glicólisis resulta en productos finales que contienen otros oligómeros además del monómero BHET, siendo una dificultad la purificación de la mezcla obtenida si el monómero BHET es el que se desea por separado (Patterson, 2007).

#### 4.3.1 Reacción de Transesterificación

Los compuestos que contienen el grupo funcional mostrado en la figura N° 4.7 se conocen como ésteres. R puede ser hidrógeno, alquilo ó arilo, y R' puede ser alquilo ó arilo.

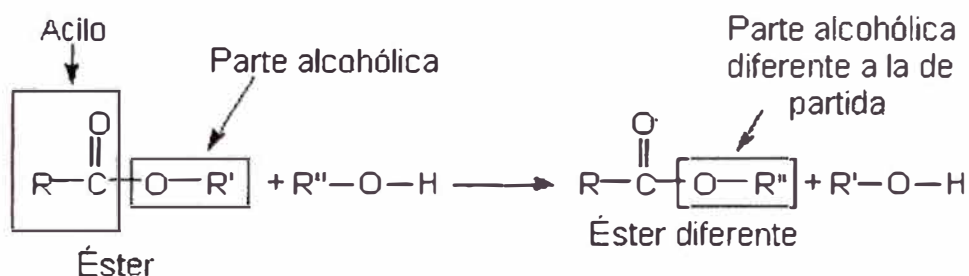
**FIGURA N° 4.8**  
**GRUPO FUNCIONAL DE ÉSTERES**



Fuente: Seymour, R. B. (1988). "Los polímeros están en todas partes". p.327

Un éster consta de dos partes; una de éstas proviene de un ácido carboxílico y se le llama acilo, la otra deriva de un alcohol y se le denomina parte alcohólica ó grupo alcóxido. Los ésteres reaccionan con alcoholes en presencia de un catalizador para producir un nuevo éster, en el que la parte alcohólica es diferente, y un nuevo alcohol. Estas reacciones reciben el nombre de reacciones de transesterificación, y son catalizadas por ácidos ó por bases.

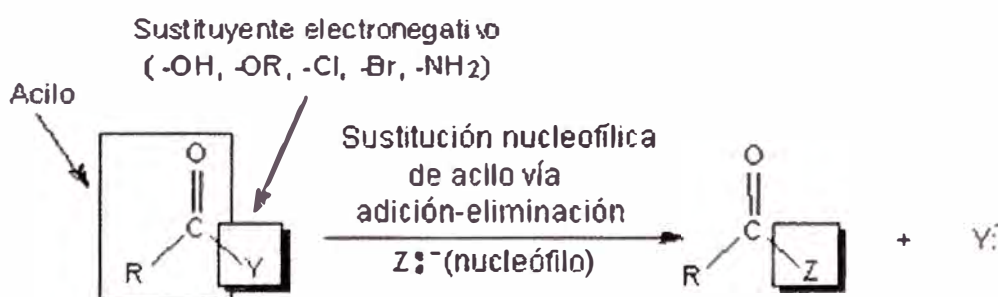
**FIGURA N° 4.9**  
**REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN**



Fuente: Seymour, R. B. (1988). "Los polímeros están en todas partes". p.328

A los ésteres se les considera derivados de acilo ( $R\text{-CO-Y}$ ). Los derivados de acilo están constituidos por un grupo acilo unido a un sustituyente electronegativo, el cual puede actuar como grupo saliente en una reacción de sustitución nucleofílica, de ahí que a este tipo de reacción se le denomine Sustitución Nucleofílica de Acilo (SNAc) (Seymour, 1988).

**FIGURA N° 4.10**  
**REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN**



Fuente: Seymour, R. B. (1988). "Los polímeros están en todas partes". p.329

Por ende, mecanísticamente la transesterificación es una sustitución nucleofílica de acilo.

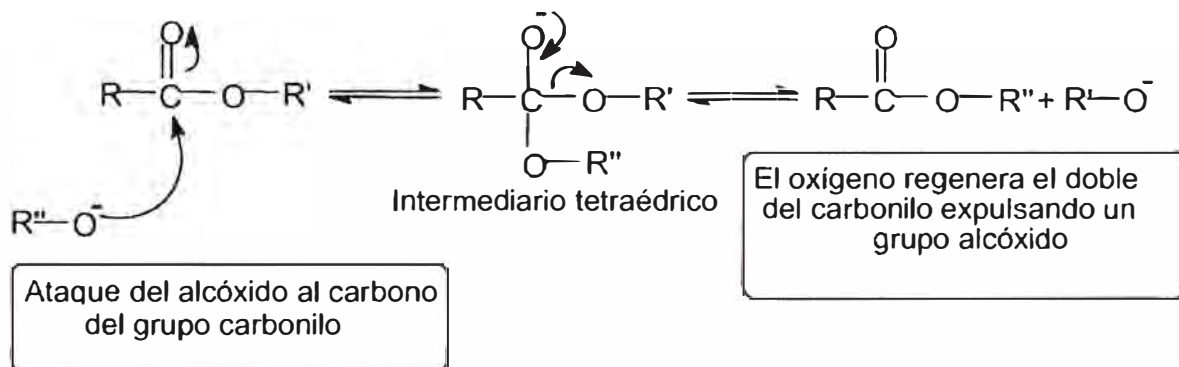
La transesterificación es una reacción de equilibrio, que puede ser desplazado hacia el éster producto usando un exceso

significativo de alcohol reactivo, ó bien, removiendo del medio de reacción al alcohol producto.

La transesterificación catalizada por base es una sustitución nucleofílica de acilo mediante un mecanismo de adición-eliminación. La base generalmente es el alcóxido correspondiente al alcohol reactivo. El ión alcóxido desempeña la función de nucleófilo, y como tal tiene la suficiente fuerza como para atacar sin dificultad al carbono del grupo carbonilo del éster (adición), generándose así un intermediario tetraédrico. La expulsión como anión del grupo alcóxido que originalmente formaba parte del éster (eliminación), da lugar al producto de transesterificación.

FIGURA Nº 4.11

MECANISMO DE REACCIÓN EN MEDIO BÁSICO

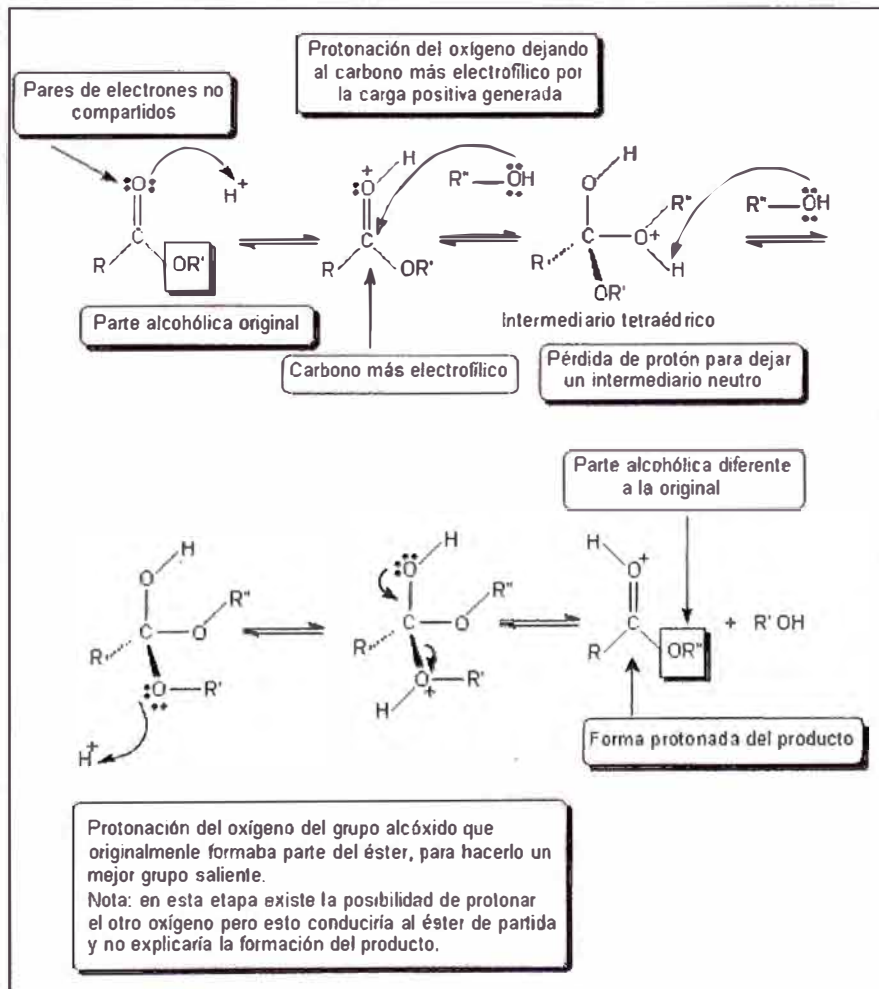


Fuente: Seymour, R. B. (1988). "Los polímeros están en todas partes". p.329

La reacción catalizada por ácido sigue un mecanismo similar, aunque un poco más complicado debido a adicionales transferencias de protón. La primera etapa consiste en la protonación del oxígeno del grupo carbonilo del éster, el cual en virtud de sus pares de electrones libres se comporta como una base. La protonación del oxígeno provoca que el carbono carbonílico se torne mucho más electrofílico, y por ende, más reactivo respecto al ataque de un nucleófilo; de ahí que dicho carbono pueda ser atacado fácilmente por un nucleófilo

relativamente débil como lo es un alcohol. Como resultado de este ataque se forma un intermediario tetraédrico, el cual es desprotonado por otra molécula de alcohol. La subsecuente protonación del oxígeno del grupo alcóxido que formaba parte del éster, convierte a dicho grupo en un mejor grupo saliente que el grupo alcóxido no protonado. En el siguiente paso, el oxígeno que originalmente constituía al carbonilo, introduce uno de sus pares de electrones expulsando a una molécula de alcohol, la cual corresponde a la parte alcohólica del éster inicial, obteniéndose de esta forma una versión protonada del éster final.

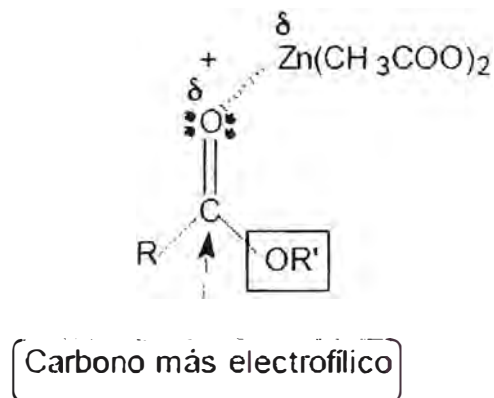
**FIGURA Nº 4.11**  
**MECANISMO DE REACCIÓN EN MEDIO ÁCIDO**





Se pueden utilizar ácidos de Lewis, como el acetato de zinc, para catalizar la transesterificación. El mecanismo mediante el cual procede la reacción es en esencia el mismo (Seymour, 1988). Con sus pares de electrones no compartidos, el oxígeno del grupo carbonilo del éster forma un complejo con el ácido de Lewis, generándose una carga positiva parcial sobre dicho átomo, lo cual provoca que el carbono se vuelva más electrofílico.

**FIGURA N° 4.13**  
**GENERACIÓN DE CARGAS EN EL ÁTOMO**



Fuente: Seymour, R. B. (1988). "Los polímeros están en todas partes". p.332

#### 4.3.2 Glicólisis

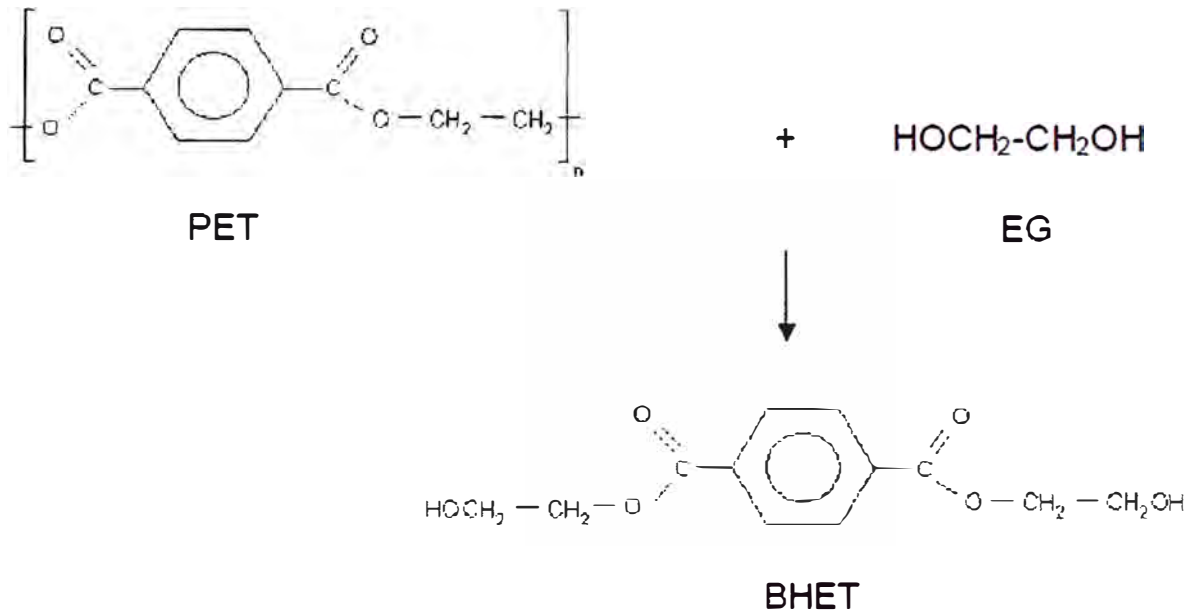
En el reciclado químico por glicólisis, el PET reacciona con EG para dar BHET.

La velocidad de esta reacción depende del tiempo de la misma, de la temperatura, presión, proporción molar de PET/EG utilizada en el proceso y número de grupos éster presentes en el polímero. Puede ser acelerada con sales de zinc, manganeso o magnesio, actuando como catalizadores (Patterson, 2007).

La reacción de glicólisis (Figura N° 4.13) resulta en la formación de bis(hidroxiethyl) tereftalato (BHET) y etilenglicol (EG), donde el PET reacciona con etilenglicol.

El BHET formado a partir de la reacción puede ser recuperado mediante cristalización o destilación quedando en colas.

**FIGURA N° 4.14**  
**REACCIÓN DE GLICÓLISIS DEL PET**



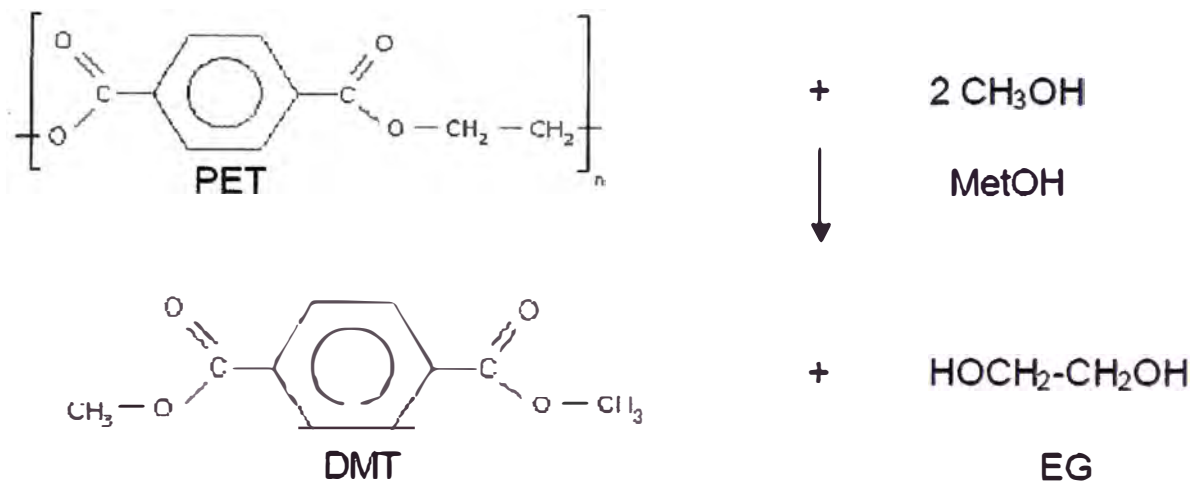
Fuente: López Fole, Marta. 2006. "Estudio comparado de procesos para el reciclado químico de PET". España. p.36.

### 4.3.3 Metanólisis

La metanólisis es el proceso que consiste en hacer reaccionar el PET con metanol, obteniendo como productos EG y DMT: Se hace necesario realizar el proceso a altas temperaturas y presiones en el caso de desear tiempos de reacción pequeños, pero estas condiciones pueden ser más suaves con el uso de catalizadores.

En general, los catalizadores que pueden ser utilizados en este tipo de reacción son acetato de zinc, acetato de magnesio, acetato de cobalto y dióxido de plomo, los cuales deben elegirse teniendo en cuenta los efectos de su presencia en los monómeros recuperados. El catalizador más comúnmente utilizado de todos ellos el acetato de zinc (Patterson, 2007).

**FIGURA Nº 4.15**  
**REACCIÓN DE METANÓLISIS DEL PET**



Fuente: López Fole, Marta. (2006). "Estudio comparado de procesos para el reciclado químico de PET". España. p.36.

#### 4.3.4 Hidrólisis

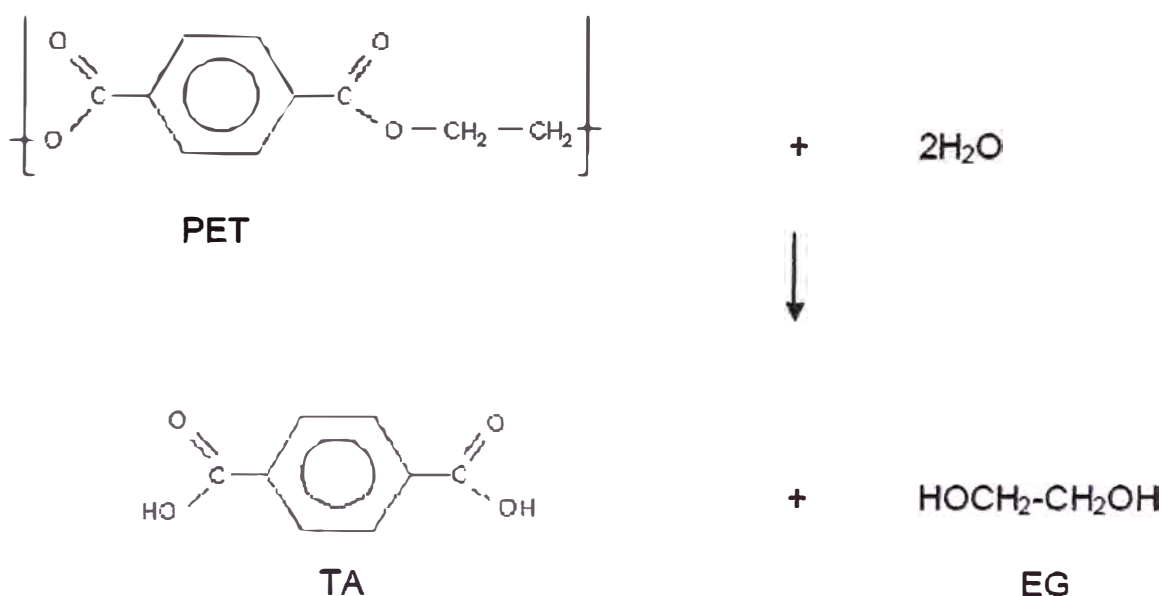
La hidrólisis consiste en hacer reaccionar el PET con agua. Como resultado de dicha reacción se obtiene EG y TA.

La hidrólisis a temperaturas inferiores a 200°C es demasiado lenta para utilizarla en procesos industriales, por lo que se hace necesario el uso de catalizadores o el uso de presiones elevadas. No obstante, esto último puede evitarse realizando hidrólisis ácidas o alcalinas, pero con el consecuente problema de separación de sales (Patterson, 2007).

La reacción de hidrólisis está supeditada a la solubilidad del ácido tereftálico formado, ya que a partir de 200°C ésta aumenta de forma considerable. Para un rango de temperaturas entre 250°C y 260°C, la solubilidad del ácido tereftálico está comprendida entre el 15% y el 20%. Por otra parte, en la hidrólisis también se hace necesario vigilar el comportamiento de posible corrosión que el ácido tereftálico pueda ocasionar en los aparatos utilizados (Patterson, 2007).

En la reacción de hidrólisis, mostrada en la figura N° 4.16, el PET reacciona con agua para producir ácido tereftálico (TA) y etilenglicol (EG).

**FIGURA N° 4.16**  
**REACCIÓN DE HIDRÓLISIS DEL PET**



Fuente: López Fole, Marta. (2006). "Estudio comparado de procesos para el reciclado químico de PET". España. p.37.

#### 4.4 Estudios de viscosidad en soluciones diluidas

Las propiedades de los polímeros en solución (Ruiz, 2005) están determinadas por las características estructurales de la cadena macromolecular solvatada. La estructura depende de la naturaleza de la unidad repetitiva y, en el caso de copolímeros, de la composición y la distribución de los monómeros en la cadena.

La viscosidad es una de las propiedades más importantes de las soluciones poliméricas. La viscosidad depende de la estructura química del polímero, de las interacciones con el disolvente y del peso molecular.

Normalmente, una molécula de alto peso molecular en un buen disolvente adquiere un gran volumen hidrodinámico y la viscosidad de la solución aumenta. La viscosimetría de soluciones diluidas está

relacionada con la medida de la habilidad intrínseca de un polímero para incrementar la viscosidad de un disolvente a una temperatura determinada y es útil para obtener información relacionada con el tamaño y la forma de las moléculas de polímero en solución y las interacciones polímero-disolvente. En el régimen diluido la viscosidad de una solución polimérica (para concentraciones de polímero muy bajas) es determinada relativa a la viscosidad del disolvente. Los siguientes términos son definidos en estos casos:

**Viscosidad relativa:** 
$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0}$$

donde  $\eta$  es la viscosidad de la solución de polímero y  $\eta_0$  es la viscosidad del disolvente puro.

**Viscosidad específica:** 
$$\eta_{SP} = \eta_r - 1 = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0}$$

**Viscosidad reducida:** 
$$\eta_{RED} = \frac{\eta_{SP}}{C}$$

donde  $c$  es la concentración de polímero. Ésta es una medida de la habilidad de un polímero para aumentar la viscosidad de un disolvente.

Aun en soluciones muy diluidas las moléculas de polímero son capaces de interacciones intermoleculares. Las dos contribuciones a la viscosidad reducida son el movimiento de las moléculas aisladas en el disolvente y la interacción entre las moléculas del polímero y la solución. Para eliminar las interacciones es necesario extrapolar a concentración cero para obtener las viscosidades inherente y reducida comúnmente conocidas como viscosidad intrínseca.

La viscosidad intrínseca tiene las unidades de masa/volumen y es una medida del tamaño de una molécula en solución. Es una medida de la

habilidad de una molécula de polímero para aumentar la viscosidad de un disolvente en ausencia de interacciones intermoleculares.

El peso molecular viscosimétrico se puede calcular utilizando la ecuación de Mark-Houwink-Sakurada en la cual  $M_v$  es el peso molecular viscosimétrico promedio y  $K$  y  $\alpha$  son constantes para un sistema dado polímero/disolvente/temperatura. Se puede calcular el peso molecular si se conocen los valores de  $K$  y  $\alpha$  para un conjunto de condiciones particulares. Las constantes en la ecuación se pueden determinar para establecer la dependencia entre la viscosidad intrínseca y el peso molecular promedio en peso ( $M_w$ ) de muestras de calibración.

$$[\eta] = K \overline{M}_v^\alpha$$

Los valores de las constantes del modelo para determinar el peso molecular del PET empleando como solvente una solución de fenol y tetracloruro de carbono en una relación en volumen 3:5 son (Ver anexo N° A3. 4):

$$K = 0.0229 \text{ ml/g}$$

$$\alpha = 0.73$$

#### **4.5 Depolimerización Química Vía Glicólisis de los Residuos Plásticos tipo PET**

El proceso de reciclaje químico de PET por glicólisis puede realizarse de varias maneras: empleando glicoles diversos, variando condiciones de presiones y temperaturas del proceso de reacción, utilizando diferentes tiempos de operación o empleando equipos de distinto tipo.

El reciclaje de PET residual por glicólisis es el más habitual cuando el reciclaje químico es escogido como estrategia de tratamiento de residuos de PET. Este hecho, se debe en cierto modo, a la no utilización de presiones elevadas en la reacción de obtención de monómeros, lo que implica costos menores de los equipos a utilizar.

En las investigaciones realizadas en este tema (Ver sección 1.2), se ha experimentado con varios solventes o mezclas de ellos: etilenglicol, dietilenglicol, propilenglicol o mezcla de estos. Los resultados revelan que el rendimiento de reacción, y otros parámetros de operación, especialmente el tiempo de reacción y concentración varían de solvente a solvente. Los mejores resultados se han obtenido empleando etilenglicol como solvente, es por ello que para este trabajo se ha optado por emplearlo como solvente de reacción.

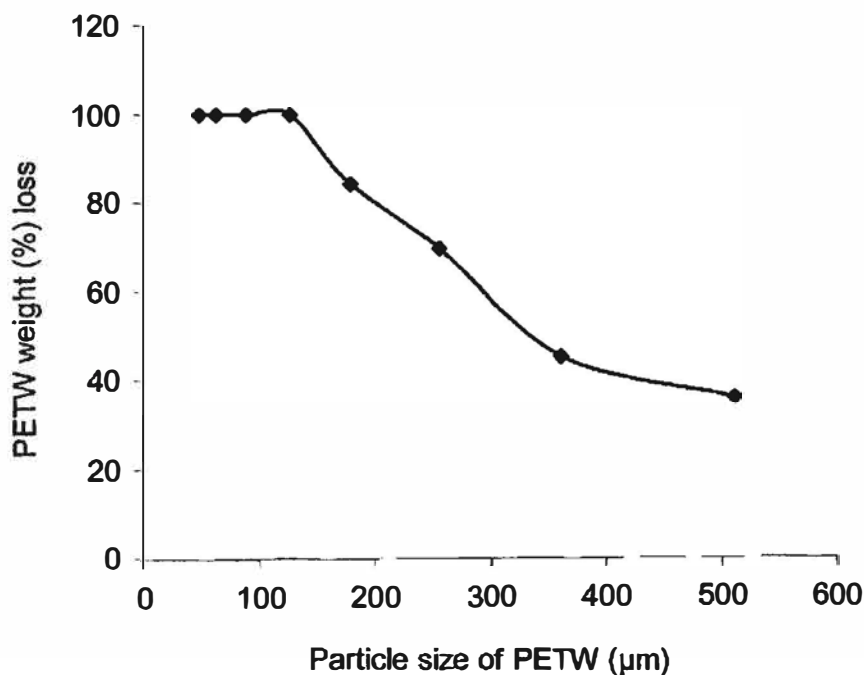
En cuanto al catalizador, las pruebas con acetato de zinc, plomo, manganeso y cobalto llevaron a la conclusión que el tipo de catalizador afecta la tasa inicial de reacción, pero no el equilibrio final logrado. Los mismos estudios muestran que el acetato de zinc es el que logra una mayor velocidad de reacción al inicio. Por esta razón es el más usado en estos procesos, y por la misma razón el elegido en este estudio.

#### **4.5.1 Parámetros de operación**

De acuerdo a estudios realizados, los productos de glicólisis consisten principalmente en BHET y sus dímeros. El polvo de PET residual usado con un tamaño de partícula en un rango de 50 a 150 $\mu$ m proporciona una velocidad de reacción relativamente rápida, logrando un tiempo óptimo de reacción de 90 minutos a 197°C y una presión de trabajo ligeramente superior a la atmosférica para lograr un 99% de conversión de PETW, usando acetato de zinc como catalizador, empleando una proporción en masa EG/PETW = 4.46 y AcZn/PETW = 0.04 (Goje, et. al., 2003).

FIGURA N° 4.17

CONVERSIÓN DEL PET EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA



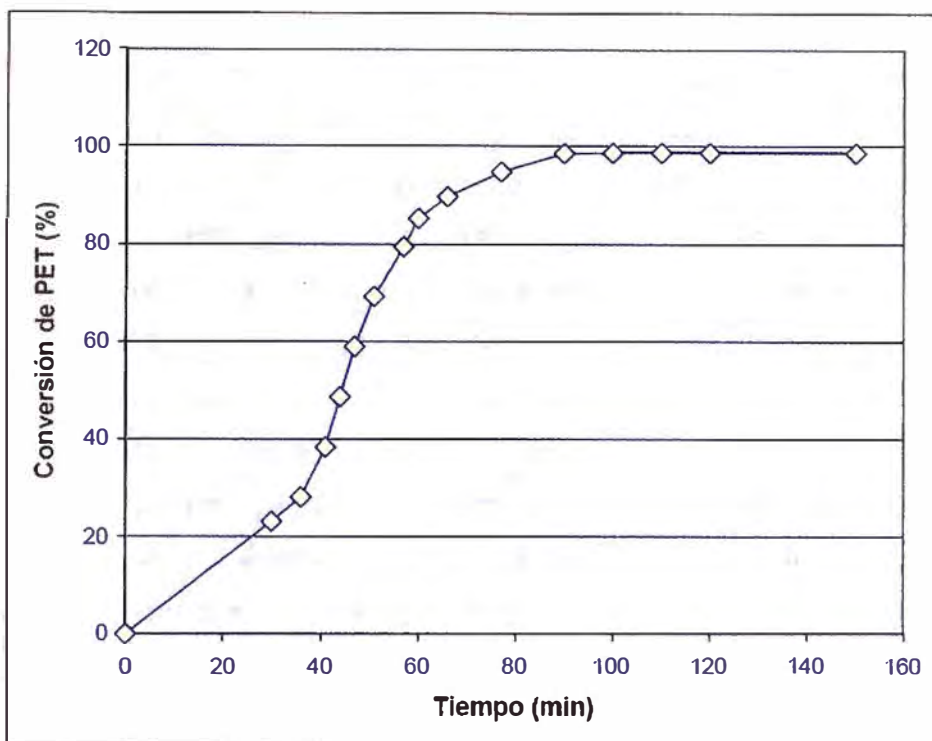
Fuente: Goje, A.S., Mishra, S. (2003). "Cinética química, simulación y termodinámica en la depolimerización glicólica del polietilén tereftalato residual con optimización del catalizador para el reciclaje de productos monoméricos con valor agregado", p.320

Los resultados de las pruebas de optimización del tamaño de la partícula de PETW para la glicólisis se muestran en la figura N° 4.17. Las pruebas se llevaron a cabo durante 90 minutos, en presencia de acetato de zinc como catalizador y etilenglicol como solvente ( $EG/PETW = 4.46$  y  $AcZn/PETW = 0.04$ ), operando a  $197^{\circ}C$  y  $1atm$ . Las pruebas se realizaron con tamaños de partícula desde  $50$  a  $512.5\mu m$ , y se observa que cuanto más grande es el tamaño de la partícula, la conversión de PETW disminuye. Inicialmente, la conversión de PET fue constante y máxima (100%) para partículas de  $50$ ,  $64$ ,  $90$  y  $127.5\mu m$ , pero después la conversión de PET fue disminuyendo con el incremento de tamaño de la partícula ( $181$ ,  $256$ ,  $362.5$  y  $512.5\mu m$ ). Esto indica que la conversión de PETW es inversamente proporcional al tamaño de la partícula. El tamaño



óptimo de la partícula de PETW es con la que se realiza la máxima conversión. El valor óptimo del tamaño de PETW de acuerdo a los resultados es de 127.5µm.

**FIGURA N° 4.18**  
**CONVERSIÓN DEL PET EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA LA GLICÓLISIS**



Fuente: López Fole, Marta. (2006). "Estudio comparado de procesos para el reciclado químico de PET", Anexo. España. p.30.

Manteniendo el tamaño de partícula de PETW en 127.5µm, el tiempo de reacción fue optimizado variando desde 30 a 150 minutos para la depolimerización de PETW operando a 197°C y 1atm, usando etilenglicol y acetato de zinc ( $EG/PETW = 4.46$  y  $AcZn/PETW = 0.04$ ) como solvente y catalizador, respectivamente. Los resultados de estas pruebas, se muestran en la figura N° 4.18. Inicialmente la conversión de PETW fue baja, sin embargo, con el incremento del tiempo de reacción la conversión fue aumentando hasta casi 100%. Después de 90 minutos de tiempo reacción, no se observa incremento en la conversión de PETW. Estos resultados indican que la conversión

de PETW es proporcional al tiempo de reacción. El tiempo óptimo de reacción es el tiempo en que la conversión de PETW es máxima y permanece constante después de él. Los resultados muestran que el tiempo óptimo de reacción es de 90 minutos.

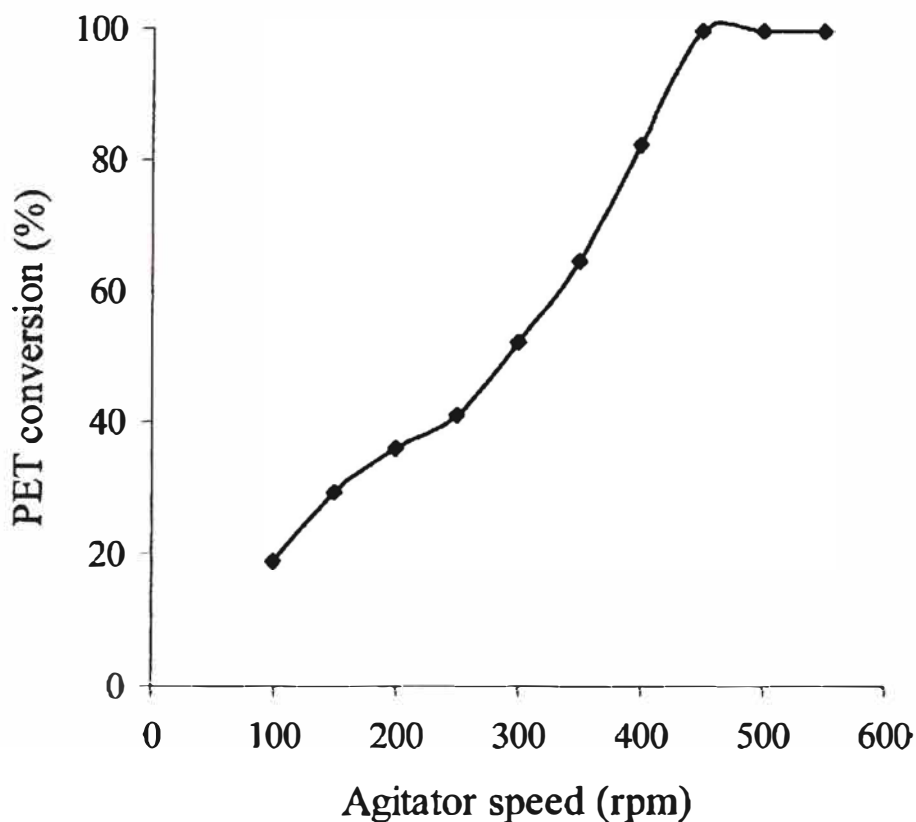
Estudios realizados (Goje, et. al., 2003) sobre la optimización de la velocidad de agitación en la conversión de PET, muestran que al mantener un tamaño de partícula promedio de  $127.5\mu\text{m}$ , utilizando acetato de zinc y etilenglicol ( $\text{EG/PETW} = 4.46$  y  $\text{AcZn/PETW} = 0.04$ ) como catalizador y solvente, respectivamente, operando a presión atmosférica y a  $197^\circ\text{C}$  durante 20 minutos, la velocidad de agitación óptima es de 450rpm. La prueba fue llevada a cabo a varias velocidades de agitación (100 – 550rpm) a intervalos de 50rpm. Los efectos de la variación de la velocidad de agitación sobre la conversión del PET se muestran en la figura N° 4.19. Los resultados muestran que la conversión del PET se incrementa hasta los 450rpm, para luego mantenerse constante.

De lo anteriormente descrito, queda establecido que para el PETW característico en los residuos de la India (lugar donde se han realizado las pruebas con resultados más prometedores), los parámetros de operación para la glicólisis de PETW son:

Temperatura	=	$197^\circ\text{C}$
Presión	=	1atm
Tamaño de partícula	=	$150\mu\text{m}$
Velocidad de agitación	=	450rpm
Tiempo de reacción	=	90 minutos

Estos parámetros son las condiciones en las pruebas experimentales de este trabajo, variando la concentración de solvente y catalizador, tomando como base las relaciones en peso con las que se llevaron a cabo todas estas pruebas:  $\text{EG/PETW} = 4.46$  y  $\text{AcZn/PETW} = 0.04$ .

**FIGURA N° 4.19**  
**EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN SOBRE LA CONVERSIÓN**  
**DEL PET**



Fuente: Goje, A.S., Mishra, S. (2003). "Cinética química, simulación y termodinámica en la depolimerización glicolítica del polietilén tereftalato residual con optimización del catalizador para el reciclaje de productos monoméricos con valor agregado", p.320

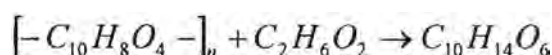
#### **4.5.2 Mecanismo de la Reacción**

El mecanismo de reacción de la depolimerización de PET consiste en tres reacciones reversibles. El primer paso es una protonación rápida del carbono del grupo carbonil en la cadena del polímero en donde el oxígeno del grupo carbonil es convertido a un segundo grupo hidroxil. En el segundo paso, el oxígeno del grupo hidroxil de la molécula añadida (agua, metanol o etilenglicol) ataca lentamente al átomo de carbono protonado del grupo carboxil. El último paso es una rápida remoción del oxígeno del grupo carbonil (ahora como grupo hidroxilo) y un

protón bajo la forma de agua o un alcohol simple y el protón catalítico. Debido a que el segundo paso es una etapa lenta, la razón de depolimerización puede cambiar de acuerdo a qué tan rápido el agente de depolimerización puede atacar el carbono del grupo carboxil después de la protonación (Cornell, 2003).

#### 4.5.3 Cinética de la Reacción

La reacción de glicólisis se describe a continuación, cuya fórmula molecular de las sustancias que forman parte de ella puede verse en el capítulo 3.



Las condiciones para esta reacción, glicólisis de solución se consideran de 190°C – 245°C y una presión ligeramente superior a la atmosférica, considerada por la pérdida de presión que tiene lugar en los reactores en los que se lleva a cabo, pero que puede considerarse prácticamente igual a ella.

La velocidad de reacción de la glicólisis de PET, puede representarse mediante la siguiente expresión (López, 2006, Anexo):

$$-r_A = -\frac{d[EL]}{dt} = k_G \cdot [EG][EL] - k'_G \cdot [BHET] \quad \dots \text{Ec. 4.11}$$

Donde:

$-r_A$  es la velocidad global de la reacción, en  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

$-\frac{d[EL]}{dt}$  es la velocidad de desaparición de los grupos etilén

unidos al éster que figuran en el PET, en  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

$k_G$  es la constante de velocidad de la reacción directa o de glicólisis, en  $\text{l} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

$[EG]$  es la concentración de etilenglicol, en  $\text{mol/l}$ .

[EL] es la concentración de los grupos etilén unidos a grupos éster que figuran en el PET, o bien la concentración de la unidad repetitiva de PET, en mol/l.

$k'_G$  es la constante de velocidad de la reacción inversa o de policondensación, en  $\text{min}^{-1}$ .

[BHET] es la concentración de bis(hidroxietil) tereftalato, en mol/l. La relación estequiométrica (relación molar) de los reactantes es de PET:EG = 1:1. En el sistema de estudio, intervienen 104 mmol de PET, mientras que las moles de EG varían de 697mmol a 2438mmol. Considerando que el EG está en exceso, su concentración se puede considerar constante a lo largo de la reacción.

En los minutos iniciales de la reacción, la velocidad de la reacción inversa o de policondensación es muy pequeña, por lo que se puede despreciar (Goje, et. al., 2003), ya que la reacción principal es la de la reacción directa o de glicólisis. El exceso de solvente orienta la reacción hacia el primer miembro del lado derecho de la ecuación 4.11; con lo que el término  $k'_G \cdot [\text{BHET}]$  puede eliminarse de esta ecuación quedando la expresión de velocidad global como se indica en la ecuación 4.12.

$$-r_A = -\frac{d[\text{EL}]}{dt} = k_G \cdot [\text{EG}] [\text{EL}] \dots \text{Ec. 4.12}$$

Tomando:

$$[\text{EL}]_f = [\text{EL}]_o \cdot (1 - X) \dots \text{Ec. 4.13}$$

Quedando la expresión de velocidad de glicólisis de PET simplificada siguiente, integrando la ecuación 4.12 (reacción de pseudo-primer orden):

$$\frac{1}{[EG]} \cdot \ln\left(\frac{1}{1-X}\right) = k_G t + C \quad \dots \text{Ec. 4.14}$$

Donde las diferentes expresiones equivalen a:

t es el tiempo de reacción, en min

X es la conversión de PET

$[EL]_f$  se refiere a la concentración de la unidad repetitiva de PET cuando la reacción ha finalizado, en  $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ .

$[EL]_o$  se refiere a la concentración de la unidad repetitiva de PET inicial, en  $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ .

C es una constante resultante de integración, cuyas unidades son  $\text{l}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

## CAPÍTULO V

### DISEÑO EXPERIMENTAL

Este trabajo tiene como objetivo principal estudiar el comportamiento de los residuos plásticos tipo PET presentes en los RSU de la ciudad de Lima, con sus características propias, en un proceso de glicólisis en fase líquida, determinando las relaciones óptimas de solvente y catalizador en dicha reacción.

Las pruebas se llevaron a cabo en un agitador magnético que cuenta con un sistema de calefacción eléctrico incorporado; la descripción completa del equipo, su funcionamiento y manipulación se describe en el anexo N° 1. En este equipo se puede trabajar a las condiciones de agitación y temperatura necesarias. Este equipo genera una velocidad de agitación de 60rpm a 1200rpm y una temperatura máxima de 540°C. En la figura N° 5.1 se muestra el equipo utilizado.

**FIGURA N° 5.1**  
**AGITADOR MAGNÉTICO CON CALEFACCIÓN SERIE SP131320-33**



El equipo mostrado en la figura anterior tiene dos diales, uno para controlar la temperatura y el otro para la velocidad de agitación. La temperatura, además de controlarse con el equipo, también es monitoreada constantemente de manera manual con un termómetro de mercurio operativo en el rango  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $410^{\circ}\text{C}$  de marca Silver Brand, serie 804532 y con certificado de calibración vigente CSA-1047-09.

### **5.1 Condiciones experimentales de las pruebas de glicólisis de PETW**

Los parámetros de operación en esta prueba son los siguientes:

- (1) Presión
- (2) Temperatura
- (3) Velocidad de agitación
- (4) Tiempo de reacción
- (5) Granulometría de la muestra
- (6) Concentración del solvente
- (7) Concentración del catalizador

Los parámetros (6) y (7) son materia de investigación de este trabajo y la determinación de las relaciones óptimas se trata en el Capítulo VI.

Todos los estudios presentados en la sección 1.2, Antecedentes de la Investigación, indican que para la glicólisis de solución se necesitan temperaturas relativamente elevadas (pero inferiores al punto de ebullición del solvente), y presiones ligeramente superiores a la atmosférica, de tal manera que se pueda compensar la pérdida de presión en un reactor. Estos mismos estudios indican que en las condiciones experimentales de laboratorio todas las pruebas se llevaron a cabo a 1atm, es por ello que en este trabajo todas las pruebas se realizaron a presión atmosférica.

La temperatura de reacción está limitada por el punto de ebullición del solvente. Siendo el solvente elegido el etilenglicol, la temperatura máxima de operación es  $197.4^{\circ}\text{C}$  (temperatura de ebullición del EG a condiciones atmosféricas).

Las pruebas realizadas por los hindúes Goje, A. S y Mishra, S. en el 2003 empleando PET obtenido de los residuos sólidos urbanos de su país y publicadas en el artículo "Cinética química, simulación y



termodinámica en la depolimerización glicolítica del polietilén tereftalato residual con optimización del catalizador para el reciclaje de productos monoméricos con valor agregado” en la revista *Materiales Macromoleculares y de Ingeniería*. Vol. 288. p. 320-336, fueron las que mostraron resultados prometedores para el posible desarrollo industrial del reciclaje químico de residuos plásticos tipo PET vía glicólisis en fase líquida empleando etilenglicol como solvente y acetato de zinc como catalizador. Las condiciones base de operación (relación en peso del solvente y catalizador) establecidas en el estudio antes mencionado, se toman como referencia de este trabajo de investigación, así como los parámetros de velocidad de agitación, granulometría, temperatura y tiempo de reacción.

En este trabajo se establece el valor óptimo de la temperatura para la depolimerización por glicólisis de PETW, cuyo valor se fija en 195-197°C, operando a presión atmosférica y velocidad de agitación de 450rpm (figura N° 4.19) por un tiempo de 90 minutos (figura N° 4.18). Estos valores son los que se toman como base para el desarrollo de las pruebas en el presente trabajo de investigación.

En la figura N° 4.17 se aprecia el efecto de la conversión del PET en función del tamaño de la partícula para la glicólisis a las condiciones establecidas en el párrafo anterior. Aquí se determina que el valor óptimo del tamaño del PETW es de 127.5µm. En este mismo gráfico, se aprecia que con tamaños inferiores a la malla 100 (150µm) se obtienen los mismos resultados

Para este trabajo, la muestra de PET lavada y molida obtenida tiene una granulometría menor a 150µm, pues sólo se ha trabajado con el pasante de la malla 100. El análisis de granulometría y las pruebas de glicólisis se realizaron en las instalaciones del Laboratorio Central de Quimpac - Oquendo.

De acuerdo a lo explicado en esta sección, se resumen las condiciones experimentales de esta investigación:

- |                            |   |           |
|----------------------------|---|-----------|
| (1) Presión                | = | 1atm      |
| (2) Temperatura            | = | 195-197°C |
| (3) Velocidad de agitación | = | 450rpm    |

- |                                 |   |                           |
|---------------------------------|---|---------------------------|
| (4) Tiempo de reacción          | = | 90min                     |
| (5) Granulometría de la muestra | = | < 150 $\mu$ m (Malla 100) |

## 5.2 Preparación de la muestra

La muestra preparada consiste en residuos plásticos tipo PET procedentes de los residuos sólidos urbanos de los distintos distritos de la ciudad de Lima. Este material ha sido seleccionado y acondicionado de manera manual.

El acondicionamiento de la muestra llevado a cabo consiste en la remoción de etiquetas y tapas de las botellas recolectadas; posteriormente son lavadas con agua y detergente industrial para remover la suciedad y residuos del pegamento de las etiquetas adheridos a la superficie del plástico. Con el material lavado y secado se procede a lijar manualmente la superficie para obtener un polvo de PET, que es la materia prima base de análisis. Este primer polvo de PET obtenido contiene restos de limaduras de hierro provenientes del lijado, así como restos de suciedad que no fueron removidas en el primero lavado.

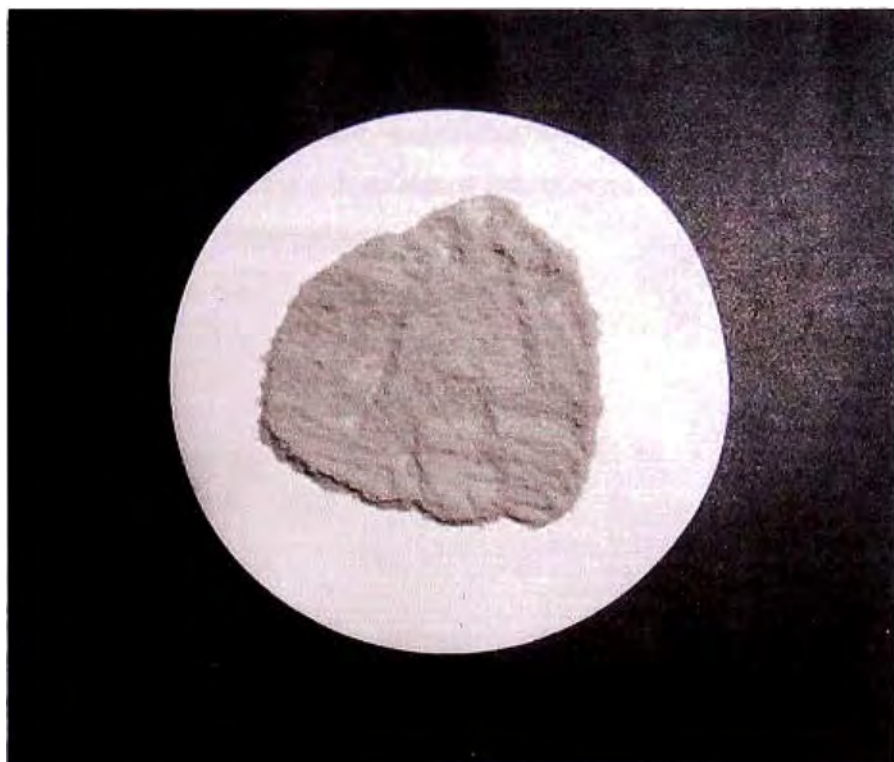
Una vez obtenido el PET molido base, se le realiza un análisis granulométrico con la malla 100 (150 $\mu$ m). Todas las pruebas se realizan sólo con el pasante de esta malla.

El PET pasante de la malla 100 se somete a un proceso de remoción de limaduras de hierro empleando para ello una limpieza con imanes y un lavado con soda cáustica, en donde se termina de separar cualquier resto metálico por densidad para finalmente ser lavado, filtrado y secado. La muestra de PET limpia y seca es la que se va a emplear en todas las pruebas experimentales. En las fotografías mostradas a continuación se puede apreciar el PETW antes y después de haber sido lavado y preparado para el inicio de las pruebas.

**FIGURA N° 5.2**  
**PETW BASE SIN LIMPIAR**



**FIGURA N° 5.3**  
**PETW PREPARADO PARA EL INICIO DE LAS PRUEBAS**



### **5.3 Prueba de Referencia**

Antes del inicio de las pruebas de glicólisis de solución se programó un ensayo preliminar a las condiciones de referencia conocidas con el objetivo de establecer una línea base en cuanto a resultados y variación de las relaciones en peso del solvente y catalizador.

Esta prueba se llevó a cabo empleando el mismo material a usar en las pruebas de glicólisis, pero tomando las condiciones base de las relaciones del solvente y catalizador descrita por Goje y Mishra (2003); esto es, una relación en peso EG/PET=4.46 y AcZn/PET=0.04.

Una vez establecida la referencia de las pruebas, se procede a la ejecución de las pruebas de glicólisis de PETW.

### **5.4 Pruebas de Glicólisis de solución**

Una vez realizada la prueba de reconocimiento, se llevaron a cabo las pruebas de glicólisis de PETW. Para ello se han programado 10 ensayos, variando la relación EG/PET desde 2.16 hasta 7.57 y la relación AcZn/PET desde 0.030 hasta 0.170; habiéndose tomado este rango a partir de los resultados obtenidos en la prueba de reconocimiento y de los trabajos de Goje (2003), Zope (2002) y Moral (2003) para distintos tipos de calidad de materia prima. El valor puntual de la relación del solvente y catalizador en cada prueba se determinó de acuerdo a los resultados experimentales a medida que se fueron obteniendo. El cuadro 5.1 muestra las condiciones de relación en peso de cada prueba desarrollada.

**CUADRO N° 5.1**  
**CONCENTRACIONES DE SOLVENTE Y CATALIZADOR**  
**EN LAS PRUEBAS**

Prueba						Relación en peso	
	PET (g)	EG <sup>(1)</sup> (ml)	AcZn (g)	t (min)	EG/PET	AcZn/PET	
<b>0</b>	<b>20.0</b>	<b>82.5</b>	<b>0.80</b>	<b>90</b>	<b>4.46</b>	<b>0.040</b>	
<b>1</b>	<b>20.0</b>	<b>40.0</b>	<b>0.80</b>	90	2.16	0.040	
<b>2</b>	<b>20.0</b>	<b>60.0</b>	<b>0.80</b>	90	3.24	0.040	
<b>3</b>	<b>20.0</b>	<b>110.0</b>	<b>0.80</b>	90	5.95	0.040	
<b>4</b>	<b>20.0</b>	<b>120.0</b>	<b>0.80</b>	90	6.49	0.040	
<b>5</b>	<b>20.0</b>	<b>140.0</b>	<b>0.80</b>	90	7.57	0.040	
<b>6</b>	<b>20.0</b>	<b>82.5</b>	<b>0.60</b>	90	4.46	0.030	
<b>7</b>	<b>20.0</b>	<b>82.5</b>	<b>1.50</b>	90	4.46	0.075	
<b>8</b>	<b>20.0</b>	<b>82.5</b>	<b>2.50</b>	90	4.46	0.125	
<b>9</b>	<b>20.0</b>	<b>82.5</b>	<b>3.20</b>	90	4.46	0.160	
<b>10</b>	<b>20.0</b>	<b>82.5</b>	<b>3.40</b>	90	4.46	0.170	

Elaboración propia

<sup>(1)</sup> Densidad del EG = 1.081g/ml

Una vez que se ha analizado el resultado de las pruebas, se determina cuáles son las mejores relaciones de solvente y catalizador, y con estos datos se realiza una última prueba de confirmación. En el ensayo definitivo con las condiciones de proceso que se consideraron eran las más favorables se determinó la constante de velocidad de reacción directa o de glicólisis tomando para ello una muestra cada 10 minutos a partir de la media hora de haberse iniciado la reacción.

En todas las muestras tomadas se va a analizar la conversión de PET (analizando el PET no reaccionante). En la muestra del minuto 90; es decir, al final de la reacción, además del análisis de conversión de PET se va a analizar el rendimiento de reacción.

En las pruebas 0 al 10 no se tomó muestras durante la reacción, se dejó llevar a cabo la reacción sin muestreo alguno, analizándose al final la conversión del PET y el rendimiento de la reacción, estableciendo un comparativo entre ellas.

### **Procedimiento experimental**

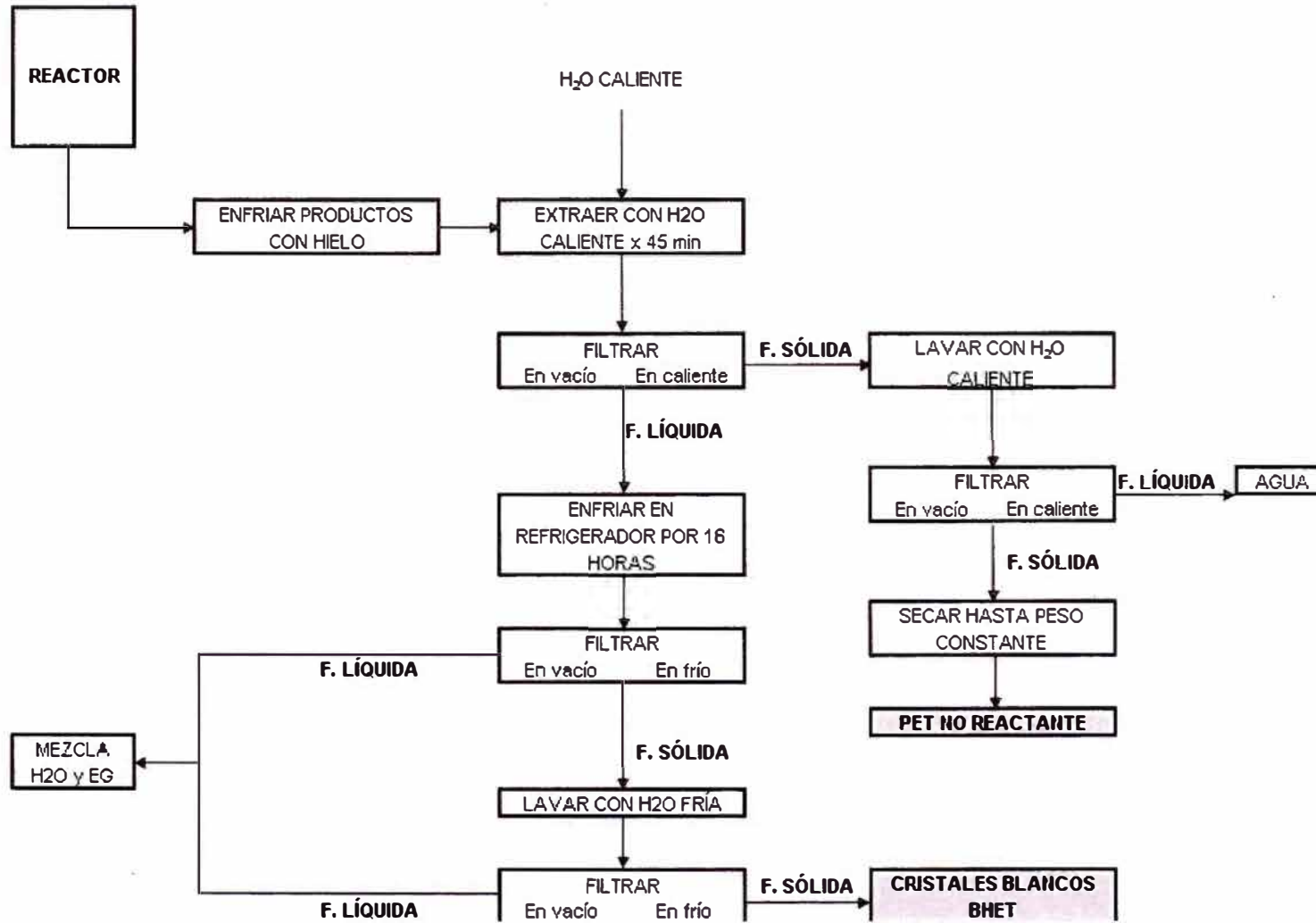
Para el desarrollo de las pruebas (Moral, Irusta, Martín y Martínez, 2003), la calefacción eléctrica del agitador magnético proporciona al sistema la temperatura necesaria para la reacción. Después de 90 minutos de tiempo de reacción, los productos de la glicólisis son enfriados con hielo y luego mezclados con agua caliente (hirviendo) durante 45 minutos para extraer los posibles oligómeros formados. Después de la extracción, la mezcla es filtrada en condiciones de vacío y en caliente. El sólido obtenido es lavado con agua caliente y secado. Ésta es la fracción "A", correspondiente al PETW que no ha reaccionado.

El filtrado es enfriado en un refrigerador por 16-20 horas a 5-8°C, obteniéndose cristales blancos de BHET, los que son filtrados y lavados con agua fría en vacío y posteriormente secados a temperatura ambiente. Ésta fracción es denominada "B" y corresponde al producto BHET.

El filtrado resultante, que es una mezcla de EG y agua puede ser destilado para recuperar EG que puede ser usado en posteriores depolimerizaciones.

El producto sólido obtenido de la glicólisis de PET residual es determinado cualitativamente a partir del espectro obtenido a partir de la transformada de Fourier infrarroja (FTIR) y del análisis del punto de fusión.

**FIGURA Nº 5.4**  
**ESQUEMA DEL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS**



Elaboración propia

Este procedimiento se repite para cada prueba variando sólo las relaciones en peso EG/PETW y AcZn/PETW. Las relaciones seleccionadas fueron escogidas después de analizar los resultados de las pruebas variando la concentración de solvente y catalizador en la mezcla, con las que finalmente se determinó cual era la mejor relación. Con estos últimos datos encontrados se realiza una última prueba de confirmación con el proceso descrito anteriormente.

### 5.5 Determinación del peso molecular del PETW

La viscosidad específica se relaciona con el peso molecular del PETW a 25°C y fue determinada por el método de viscosidad de Ostwald. El solvente usado fue una mezcla de fenol y tetracloroetano en proporciones de 3:5 (v=v). El viscosímetro de Ostwald limpio y seco fue empleado en la determinación del tiempo de flujo para la mezcla solvente a diferentes concentraciones de PETW (0.001% - 0.006%). El peso molecular del PETW se obtiene a partir de la viscosidad específica calculada a varias concentraciones según la relación de Mark-Houwink:

$$VI = \frac{\eta_{sp}}{C} = kM^{\alpha} \dots \text{Ec. 5.1}$$

Siendo,

$\eta_{sp}/C$	=	viscosidad específica
C	=	peso del polímero
k	=	constante, $22.9 \times 10^{-3}$ ml/g
$\alpha$	=	constante, 0.73
M	=	peso molecular, g/mol

Esta prueba se realizó en las instalaciones del Laboratorio N° 21 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil.



## 5.6 Análisis de productos

Los datos para necesarios para ajustar la cinética de la reacción mostrada en la ecuación 4.14 son la concentración del etilenglicol y la conversión de PET.

$$\frac{1}{[EG]} \cdot \ln\left(\frac{1}{1-X}\right) = k_G \cdot t + C \quad \dots \text{Ec. 4.14}$$

La concentración del EG se obtiene de las condiciones de operación para prueba (siendo una constante), mientras que la conversión del PET se obtiene del siguiente cálculo:

$$\% \text{Conversión PETW} = \frac{W_{PET,i} - W_{PET,unreacter}}{W_{PET,i}} \times 100 \quad \dots \text{Ec. 5.2}$$

Con lo que se completan los datos para ajustar la velocidad de reacción de la glicólisis del PETW.

El rendimiento del BHET se calcula de la siguiente forma:

$$\% \text{Rendimiento BHET} = \frac{m_{BHET,out}}{m_{PETW,in}} \times 100 \quad \dots \text{Ec. 5.3}$$

Donde,

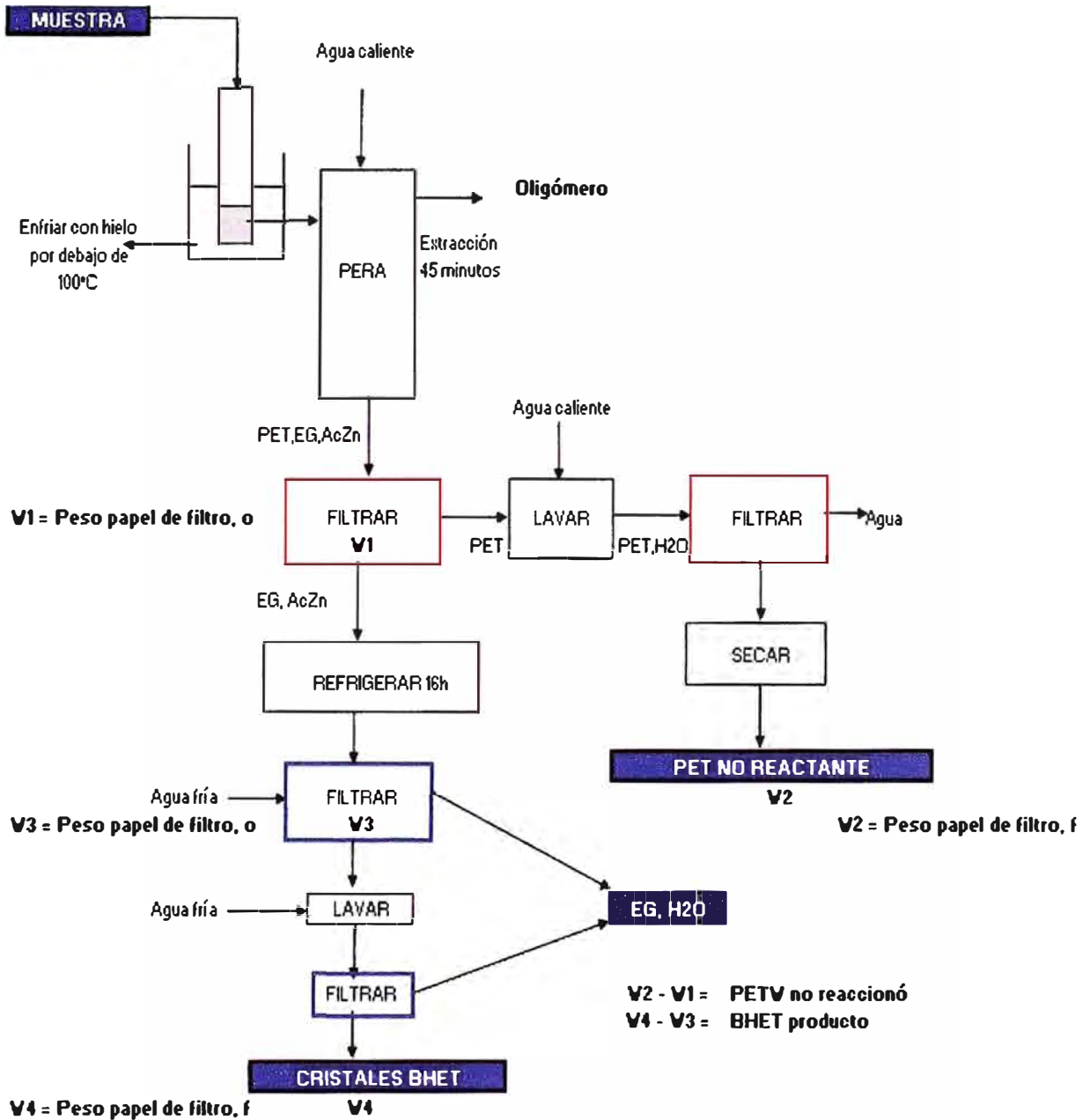
$W_{PET,i}$  : Peso inicial PETW

$W_{PET,f}$  : Peso PETW que no ha reaccionado

$m_{BHET}$  : Número de moles BHET formado

$m_{PETW,i}$  : Número de moles PETW iniciales

**FIGURA N° 5.5**  
**ESQUEMA ANÁLISIS DE PRODUCTOS**



Elaboración propia

## CAPÍTULO VI PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

### 6.1 Análisis de las muestras de PETW

#### 6.1.1 Análisis granulométrico

Se realizó el análisis granulométrico de la muestra base de PETW, obteniéndose los siguientes resultados:

**CUADRO N° 6.1  
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Malla	μm	% Pass
80	180	10.87
100	150	88.94

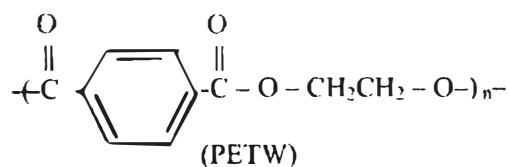
Elaboración propia

Todas las pruebas se realizaron sólo con el pasante de la malla 100.

#### 6.1.2 Determinación del peso molecular

En este ensayo se determinó el peso molecular promedio del polímero PET que sirve como materia prima para este proceso.

En primer lugar se calcula teóricamente el peso de la unidad monomérica del PET:



**Determinación del peso molecular de la unidad monomérica del PET**

El peso molecular de la unidad monomérica del PET se calcula de la siguiente manera:

$$\# C = 10$$

$$\# H = 8$$

$$\# O = 4$$

$$\overline{Mw}_{mon} = 10 \cdot 12.0111 + 8 \cdot 1.00797 + 4 \cdot 15.9994$$

$$\overline{Mw}_{mon} = \mathbf{192.17 \text{ g/mol}}$$

**Determinación de la constante del viscosímetro**

Se empleó agua como fluido de trabajo y se tomaron 10 mediciones válidas.

**CUADRO N° 6.2**  
**RESULTADOS EN LA DETERMINACIÓN DE LA**  
**CONSTANTE DEL EQUIPO**

**Medidas con agua**

<b>Medida</b>		
<b>#</b>	<b>tiempo, s</b>	<b>D.E.</b>
1	1.85	
2	1.88	
3	1.86	
4	1.85	
5	1.87	
6	1.84	
7	1.88	
8	1.86	
9	1.85	
10	1.85	
	<b>1.86</b>	<b>0.0137</b>

**T = 26 °C**

<b><math>\rho</math> =</b>	<b>996.739 kg/m<sup>3</sup></b>
<b><math>\eta_{\text{agua}}</math> =</b>	<b>0.8704 cp</b>

Coeficiente del  
 equipo:

<b>K =</b>	<b>4.6974E-07</b>
------------	-------------------

Elaboración propia

**Preparación de las soluciones**

Se prepararon 6 soluciones a partir de 100ml de solvente. La temperatura de trabajo promedio fue de 26°C.

**CUADRO N° 6.3**  
**ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE COMPONENTES DEL SOLVENTE**

		$\rho$					
		T (°C)	A	B	(g/ml)	m (g)	
$\rho$ Fenol:	C1 =	1.3798	25.5	1.832	0.121	1.071	40.1759
	C2 =	0.31598	25.7	1.832	0.121	1.071	40.1695
	C3 =	694.25	25.9	1.831	0.121	1.071	40.1631
	C4 =	0.32768	26.0	1.831	0.121	1.071	40.1599
			26.2	1.831	0.121	1.071	40.1535
			26.4	1.831	0.121	1.071	40.1471
							<b>Promedio</b> <b>40.1615</b>

		$\rho$					
		T (°C)	A	B	(g/ml)	m (g)	
$\rho$ CCl4:	C1 =	0.7986	25.5	1.832	0.084	1.586	99.150
	C2 =	0.25953	25.7	1.832	0.085	1.586	99.131
	C3 =	645.00	25.9	1.832	0.085	1.586	99.112
	C4 =	0.29593	26.0	1.832	0.085	1.586	99.103
			26.2	1.831	0.085	1.585	99.084
			26.4	1.831	0.085	1.585	99.065
							<b>Promedio</b> <b>99.1076</b>

Elaboración propia

**CUADRO N° 6.4**  
**CALCULO DE LA CONCENTRACIÓN EN CADA**  
**SOLUCIÓN DE TRABAJO**

<b>Fenol (ml)</b>	<b>CCl4 (ml)</b>	<b>W<sub>PET</sub> (g)</b>	<b>% PETW</b>	<b>Conc. (g/ml)</b>
37.50	62.50	0.0016	0.0011	1.60E-05
37.50	62.50	0.0029	0.0021	2.90E-05
37.50	62.50	0.0042	0.0030	4.20E-05
37.50	62.50	0.0063	0.0045	6.30E-05
37.50	62.50	0.0073	0.0052	7.30E-05
37.50	62.50	0.0089	0.0064	8.90E-05

Elaboración propia

**FIGURA N° 6.1**  
**SOLVENTE PURO PARA PRUEBA DE VISCOSIDAD**



**Cálculo de la viscosidad reducida**

Con el solvente puro y las diluciones preparadas como fluidos de trabajo. Se tomaron 10 mediciones válidas en cada caso.

**CUADRO N° 6.5  
CALCULO DE LA VISCOSIDAD REDUCIDA DE CADA  
SOLUCIÓN**

Medida #	% PETW						Solvente puro
	0.0011	0.0021	0.0030	0.0045	0.0052	0.0064	
	<b>tiempo, s</b>						
1	2.17	2.17	2.18	2.18	2.17	2.18	2.16
2	2.18	2.17	2.17	2.16	2.18	2.18	2.15
3	2.17	2.18	2.17	2.17	2.18	2.18	2.16
4	2.17	2.17	2.17	2.18	2.16	2.18	2.16
5	2.16	2.17	2.16	2.18	2.18	2.17	2.18
6	2.16	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.15
7	2.17	2.16	2.17	2.18	2.17	2.18	2.18
8	2.18	2.17	2.16	2.17	2.17	2.17	2.18
9	2.16	2.16	2.18	2.16	2.18	2.17	2.18
10	2.16	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17
<b>Promedio</b>	<b>2.168</b>	<b>2.169</b>	<b>2.170</b>	<b>2.172</b>	<b>2.173</b>	<b>2.175</b>	<b>2.167</b>
D.E.	0.0079	0.0057	0.0067	0.0079	0.0067	0.0053	0.0125
Max	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18
Min	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.17	2.15
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1347.102	1347.136	1347.156	1347.182	1347.212	1347.238	1347.068
$\eta$ (cp)	<b>1.3719</b>	<b>1.3726</b>	<b>1.3732</b>	<b>1.3745</b>	<b>1.3752</b>	<b>1.3765</b>	<b>1.3712</b>

Elaboración propia

Del cuadro anterior se tiene que:

$$\eta \text{ (cp)} = \boxed{1.3712} \text{ Viscosidad del solvente puro}$$

$$T = 26 \text{ }^\circ\text{C}$$



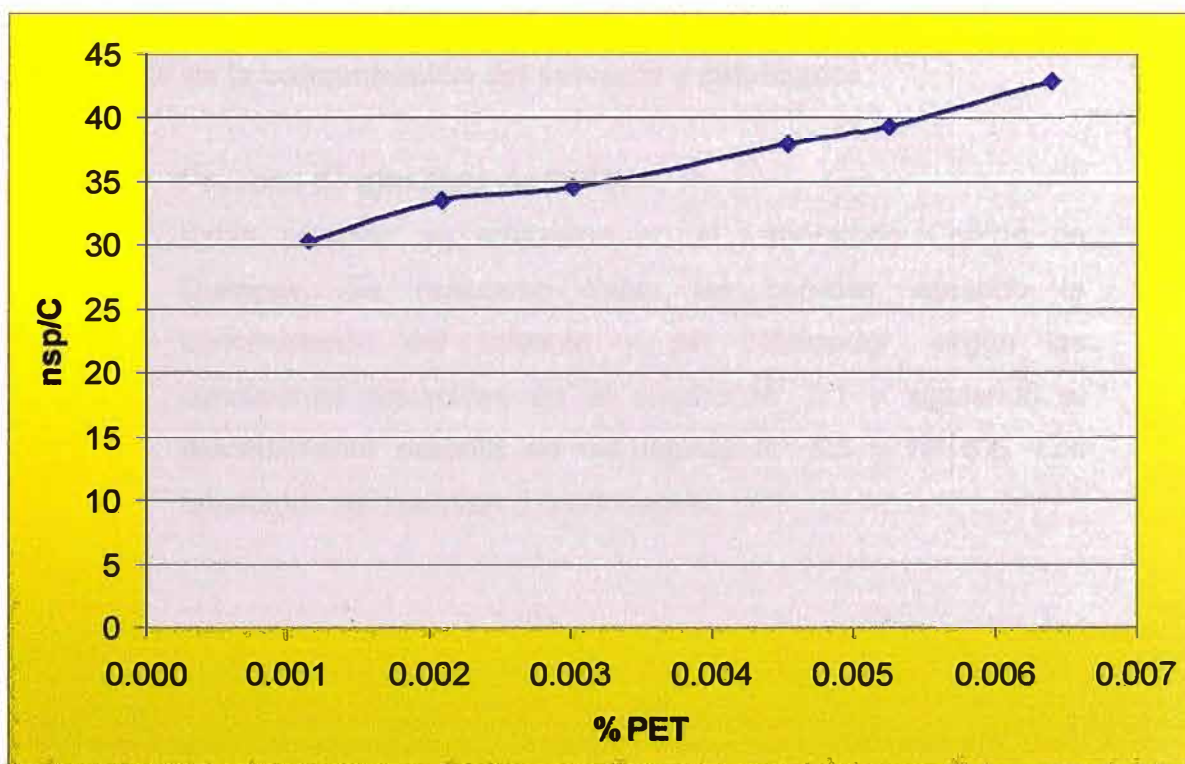
**CUADRO N° 6.6**  
**CALCULO DE LA VISCOSIDAD ESPECÍFICA DE CADA**  
**SOLUCIÓN**

	% PETW					
	0.0011	0.0021	0.0030	0.0045	0.0052	0.0064
$\eta_{sp} =$	0.49	0.97	1.45	2.39	2.88	3.82
$\eta_{sp}/C =$	30.42	33.57	34.52	37.97	39.40	42.90

Elaboración propia

Con estos datos se construye la curva  $\eta_{sp}/C$  vs % PETW.

**FIGURA N° 6.2**  
 **$\eta_{sp}/C$  vs % PETW**



Elaboración propia

Aplicando regresión lineal a los puntos obtenidos:

$$[\eta_{sp}/C] = 2239.6*[\%PET] + 28.101$$

Entonces, el intercepto con el eje Y es: 28.101.

Reemplazando en el modelo de Mark-Houwink, se tiene que el peso molecular promedio de la muestra de polímero PET residual es 17035g/mol.

Resumiendo los valores determinados de las propiedades del PETW como materia prima:

Peso molecular,  $M_w$  = 17035 g/mol

Densidad,  $\rho$  = 1.44 g/cm<sup>3</sup>

Granulometría = < 150 $\mu$ m

Punto de Fusión = 253°C

Los resultados de las propiedades peso molecular, densidad y punto de fusión de la materia prima corresponden a las descritas en la literatura.

## **6.2 Efecto de la concentración del solvente y catalizador**

### **6.2.1 Pruebas de glicólisis de PETW**

Estas pruebas se realizaron en el Laboratorio Central de Quimpac. Se realizaron todas las corridas variando la concentración del solvente y del catalizador, según las condiciones resumidas en el cuadro N° 5.1 y siguiendo el procedimiento descrito en las figuras N° 5.5 y N° 5.6. Los resultados se muestran a continuación.

**CUADRO N° 6.7**  
**DATOS DE PRUEBAS EFECTO DE CONCENTRACIÓN**

<b>Prueba</b>	<b>W1 (g)</b>	<b>W2 (g)</b>	<b>W3 (g)</b>	<b>W4 (g)</b>
<b>0</b>	1.23	7.14	1.25	19.87
<b>1</b>	1.21	11.01	1.25	14.69
<b>2</b>	1.24	7.89	1.26	18.81
<b>3</b>	1.26	5.98	1.24	21.33
<b>4</b>	1.25	5.91	1.21	21.43
<b>5</b>	1.21	5.86	1.24	21.47
<b>6</b>	1.22	8.65	1.23	17.82
<b>7</b>	1.25	7.16	1.25	19.82
<b>8</b>	1.24	6.73	1.24	20.01
<b>9</b>	1.26	6.55	1.22	19.98
<b>10</b>	1.25	6.54	1.26	19.97

Elaboración propia

En base a estos resultados se calcula la conversión del PET y el rendimiento del BHET con las ecuaciones 5.2 y 5.3.

W1: Peso de papel de filtro N° 1

W2: Peso de papel de filtro N° 1 + PET no reactante

W3: Peso de papel de filtro N° 2

W4: Peso de papel de filtro N° 2 + producto formado

FIGURA N° 6.3  
REACCIÓN GLICÓLISIS PET



**FIGURA N° 6.4**  
**FILTRACIÓN Y EXTRACCIÓN**



**CUADRO N° 6.8**  
**CÁLCULO CONVERSIÓN PET Y RENDIMIENTO BHET**

<b>Prueba</b>	<b>W<sub>PETunr</sub> (g)</b>	<b>W<sub>BHET</sub> (g)</b>	<b>mmol<sub>PETW,i</sub></b>	<b>mmol<sub>BHET</sub></b>	<b>%Conv PETW</b>	<b>% BHET</b>
<b>0</b>	<b>5.91</b>	<b>18.62</b>	104.07	73.24	<b>70.45</b>	<b>70.37</b>
<b>1</b>	<b>9.80</b>	<b>13.44</b>	104.07	52.86	<b>51.00</b>	<b>50.79</b>
<b>2</b>	<b>6.65</b>	<b>17.55</b>	104.07	69.03	<b>66.75</b>	<b>66.33</b>
<b>3</b>	<b>4.72</b>	<b>20.09</b>	104.07	79.02	<b>76.40</b>	<b>75.93</b>
<b>4</b>	<b>4.66</b>	<b>20.22</b>	104.07	79.53	<b>76.70</b>	<b>76.42</b>
<b>5</b>	<b>4.65</b>	<b>20.23</b>	104.07	79.57	<b>76.75</b>	<b>76.46</b>
<b>6</b>	<b>7.43</b>	<b>16.59</b>	104.07	65.25	<b>62.85</b>	<b>62.70</b>
<b>7</b>	<b>5.91</b>	<b>18.57</b>	104.07	73.04	<b>70.45</b>	<b>70.18</b>
<b>8</b>	<b>5.49</b>	<b>18.77</b>	104.07	73.83	<b>72.55</b>	<b>70.94</b>
<b>9</b>	<b>5.29</b>	<b>18.76</b>	104.07	73.79	<b>73.55</b>	<b>70.90</b>
<b>10</b>	<b>5.29</b>	<b>18.71</b>	104.07	73.59	<b>73.55</b>	<b>70.71</b>

Elaboración propia

El rendimiento de BHET en la prueba cero, fue del 70.37%, valor inferior al obtenido a las mismas condiciones de las relaciones del solvente y catalizador descrita por Goje y Mishra (2003); esto es, una relación en peso EG/PET=4.46 y AcZn/PET=0.04 con un tiempo de reacción de 90 minutos a una velocidad de agitación de 450rpm, trabajando con PETW con una granulometría inferior a 150 $\mu$ m. En base a este resultado y a los mencionados en la sección 5.4 se establece el rango de variación de las concentraciones del solvente y catalizador. El valor puntual de la relación del solvente y catalizador en cada prueba se determinó de acuerdo a los resultados experimentales a medida que se fueron obteniendo.

En el cuadro N° 6.9 se resumen los resultados de las pruebas de variación.

**CUADRO N° 6.9**  
**RENDIMIENTO BHET vs RATIOS DE SOLVENTE Y**  
**CATALIZADOR**

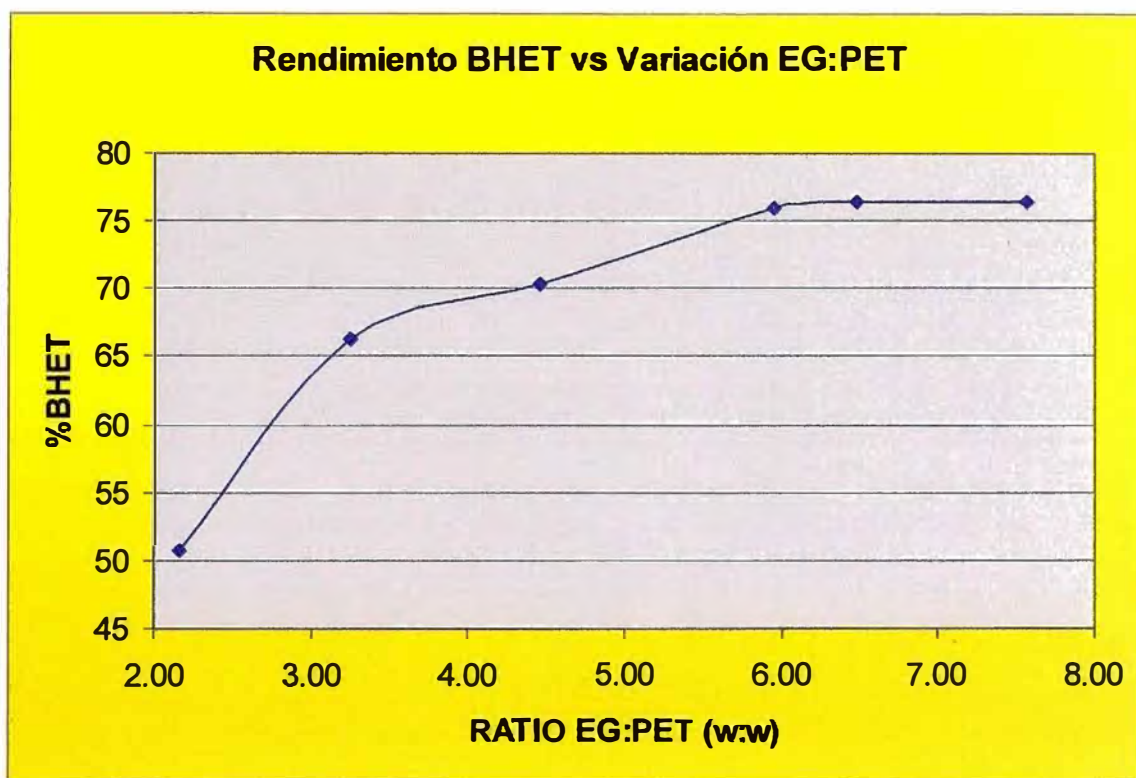
<b>%BHET</b>	<b>w:w</b>	<b>%BHET</b>	<b>w:w</b>
	<b>EG/PET</b>		<b>AcZn/PET</b>
50.79	2.16	62.699	0.030
66.33	3.24	70.371	0.040
70.37	4.46	70.182	0.075
75.93	5.95	70.938	0.125
76.42	6.49	70.900	0.160
76.46	7.57	70.711	0.170

Elaboración propia

En la figura N° 6.5 se observa que el rendimiento del monómero obtenido BHET se hace constante alrededor del 76.45% a partir de una relación w:w EG:PET de 6.25. Un incremento en la relación EG:PET no varía de manera importante el rendimiento de la reacción.

El efecto de la variación de la concentración de acetato de zinc como catalizador en la conversión de PETW se muestra en el cuadro N° 6.10. Estos resultados indican claramente que la conversión de PETW (%) se incrementa con un incremento de la concentración del catalizador hasta 0.014 moles de catalizador. Sin embargo, no se observó un incremento considerable después de 0.014 mol de catalizador.

FIGURA N° 6.5



Elaboración propia

CUADRO N° 6.10  
OPTIMIZACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ACETATO DE  
ZINC COMO CATALIZADOR

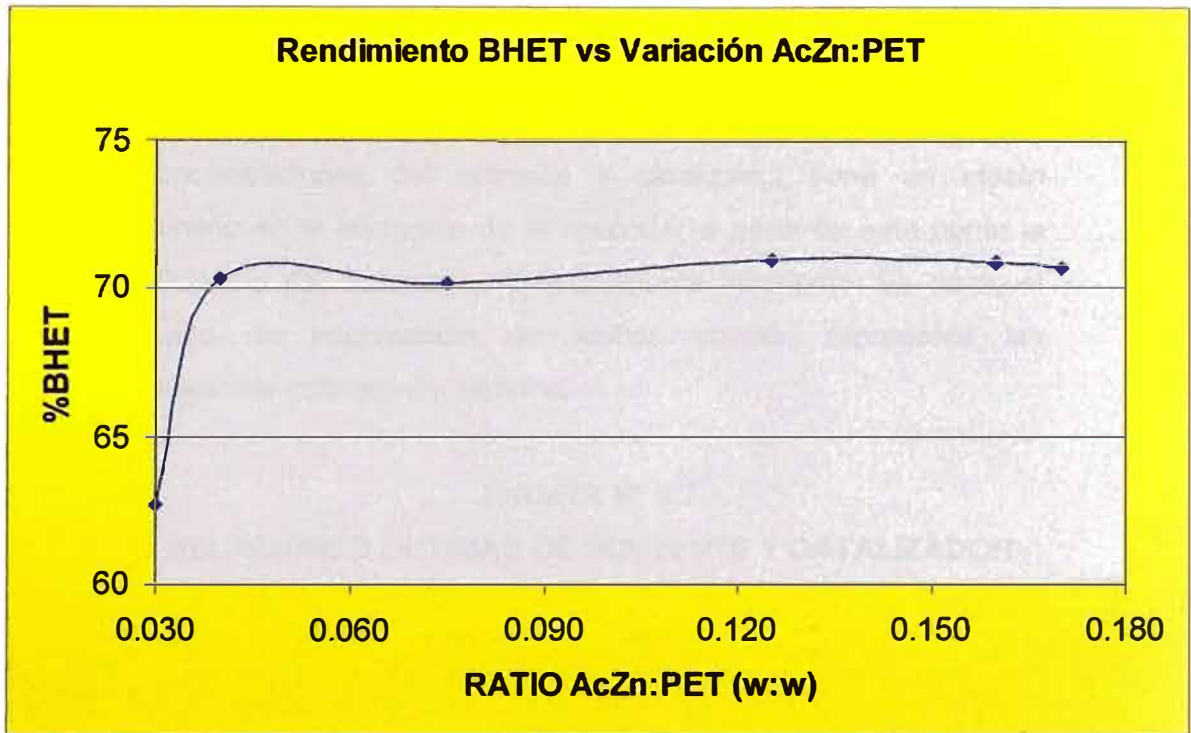
mol AcZn	%Conv PETW
0.003	62.85
0.004	70.45
0.008	70.45
0.014	72.55
0.017	73.55
0.019	73.55

Elaboración propia

En el segundo grupo de pruebas, se observa que la variación de la relación w:w AcZn:PET se hace casi constante a partir de una relación de 0.140.



FIGURA N° 6.6



Elaboración propia

### 6.2.2 Determinación de las Condiciones Óptimas del Proceso

En base a los resultados anteriores se construye la figura N° 6.7, en donde se muestra las relaciones óptimas de solvente y catalizador.

La figura N° 6.7 muestra el rendimiento del BHET vs la relación en peso del solvente y catalizador en una misma gráfica.

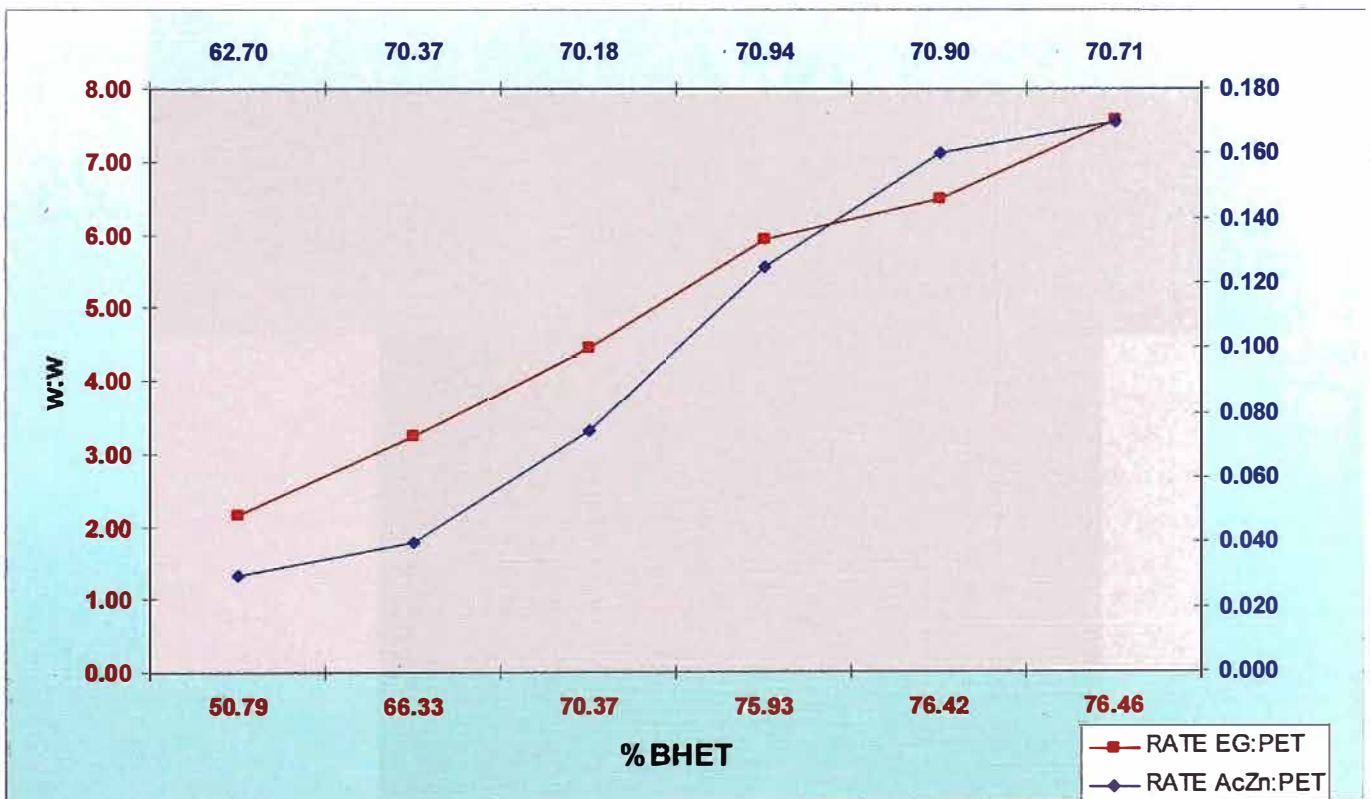
La región encerrada por las curvas debajo del punto de intersección, es la zona en la que el incremento tanto del solvente como del catalizador aumenta el rendimiento de la reacción, pero sin llegar a una respuesta óptima del sistema; se aprecia que un aumento en la concentración del solvente y catalizador tiene un efecto considerable en la eficiencia del sistema.

La región que encierran las curvas por encima del punto de intersección, es la zona en la que el incremento del rendimiento de la reacción es mínimo a pesar del incremento de la

concentración de solvente y catalizador; en esta zona el rendimiento se hace constante.

Entonces, el punto de intersección (EG:PET = 6.25 y AcZn:PET = 0.140) representa el caso en que la variación de las concentraciones del solvente y catalizador tiene un efecto mínimo en la eficiencia de la reacción, a partir de este punto la eficiencia del sistema es prácticamente invariante. Es decir, el punto de intersección de ambas curvas, representa las relaciones óptimas del sistema.

**FIGURA N° 6.7**  
**RELACIONES ÓPTIMAS DE SOLVENTE Y CATALIZADOR**



Elaboración propia

Finalmente, de la figura N° 6.7, se tiene que las relaciones en peso óptimas de solvente y catalizador con respecto al PET son:

EG:PET = 6.25

AcZn:PET = 0.140

**FIGURA N° 6.8**  
**PRODUCTO BHET FORMADO**



### 6.2.3 Prueba de confirmación

En base a las relaciones óptimas encontradas en la sección anterior se hace una prueba de confirmación. Esta prueba se realizó a las siguientes condiciones:

**CUADRO N° 6.11**  
**CONDICIONES EN PRUEBA DE CONFIRMACIÓN**

PET (g)	100.00
EG (g)	625.00
EG (ml)	578.17
AcZn (g)	14.00
t (min)	90
[PET] mg/ml	172.96
<b>w: w EG/PET</b>	<b>6.25</b>
<b>w: wAcZn/PET</b>	<b>0.140</b>

Elaboración propia

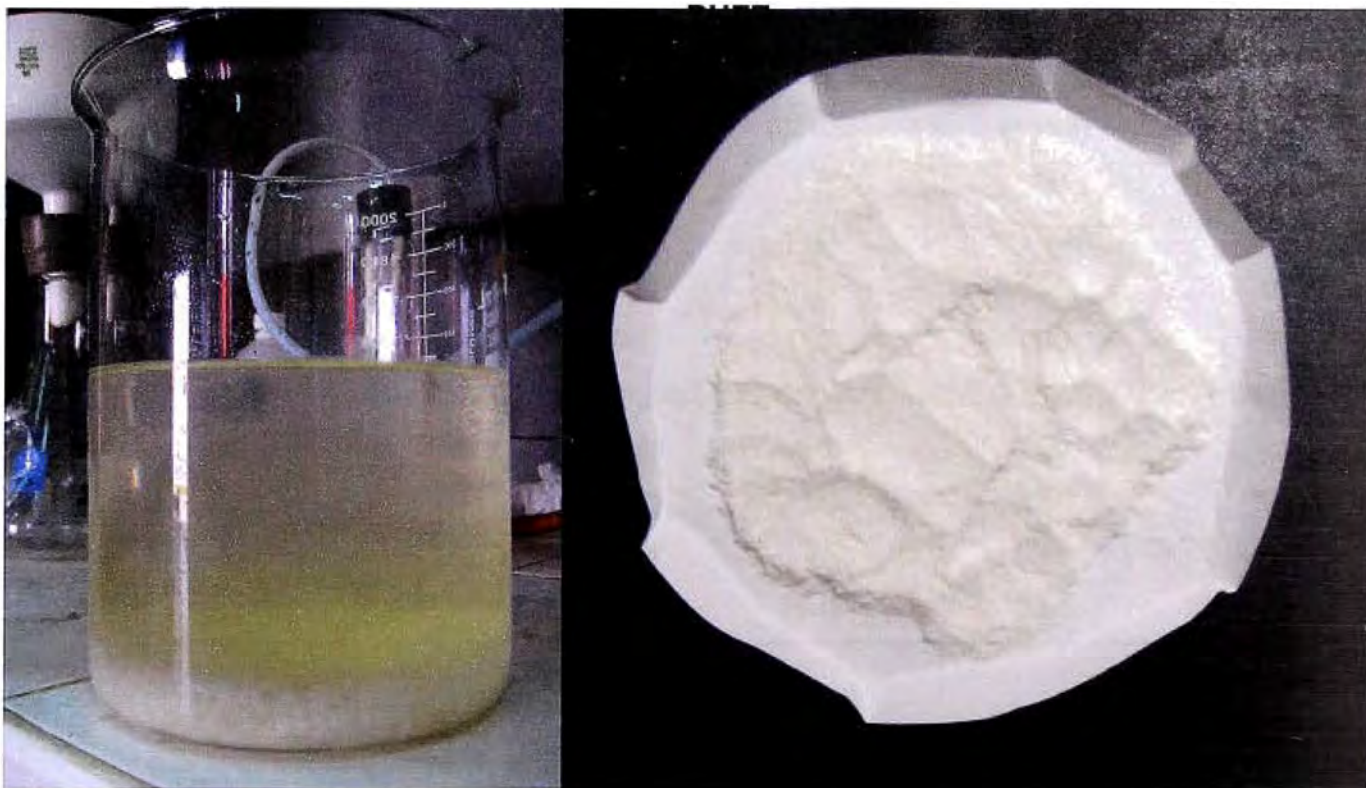
El procedimiento fue el mismo que en las pruebas anteriores. Los resultados se muestran a continuación:

**CUADRO N° 6.12**  
**RESULTADOS EN PRUEBA DE CONFIRMACIÓN**

<b>W1 (g)</b>	<b>1.23</b>
<b>W2 (g)</b>	<b>24.47</b>
<b>W3 (g)</b>	<b>1.22</b>
<b>W4 (g)</b>	<b>102.41</b>
<b>W<sub>PETunr</sub> (g)</b>	23.24
<b>W<sub>BHET</sub> (g)</b>	101.19
<b>mmol<sub>PETW,i</sub></b>	520.37
<b>mmol<sub>BHET</sub></b>	398.01
<b>%Conv PETW</b>	<b>76.76</b>
<b>% BHET</b>	<b>76.49</b>

Elaboración propia

**FIGURA N° 6.9**  
**PRODUCTO DE LA DEPOLIMERIZACIÓN POR GLICÓLISIS**



En esta prueba se verificaron los resultados óptimos esperados de acuerdo a los resultados de las pruebas anteriores.

**CUADRO N° 6.13**  
**COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LA LITERATURA CITADA**

Parámetro	Unidad	Referencia				
		Presente Trabajo	Goje, A.S., (2003)	Moral, A (2003)	Vaidya, U.R. (1989)	Chen, C.H. (2003)
Presión	atm	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Temperatura	°C	195-197	197	195-201	200	190
V. Agitación	rpm	450	450	450	500	500
Tiempo	min	90	90	150	480	90
Solvente		Etilénglicol	Etilénglicol	Etilénglicol	PE/EG (62.5:37.5)	Etilénglicol
Catalizador		AcZn	AcZn	AcZn	AcZn	AcMg
Solvente:PET	w:w	6.25	4.46	2.50	7.50	5.25
Catalizador:PET	w:w	0.14	0.04	0.25	0.50	0.21
Rendimiento BHET	%	76.5	99.0	76.0	82.5	75.5

Elaboración propia

En el cuadro 6.13 se compara los resultados obtenidos con los principales obtenidos en la literatura citada. Se aprecia que los parámetros de temperatura, presión y velocidad de agitación, en todos los trabajos son similares, mientras que el tiempo de reacción fue ajustado al evaluar la relación entre el rendimiento obtenido y las concentraciones del solvente y catalizador. Los diferentes rendimientos obtenidos y las diferentes relaciones de solvente y catalizador son característicos de la calidad y pureza de la materia prima. Debido a que no en todas las latitudes estas características son las mismas, es de esperarse diferentes resultados.

### 6.3 Análisis del producto obtenido

Para confirmar la identidad del producto obtenido, se ha obtenido el espectro de absorción IR, complementándose con la determinación del punto de fusión.

### **Espectro de Absorción Infra Rojo (IR)**

Para confirmar la identidad del producto obtenido, se realizó el análisis en un equipo de absorción IR. Este análisis se realizó en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Se realizó el análisis espectrofotométrico a las siguientes muestras:

- (1) Producto de la prueba cero.
- (2) Compósito de los productos de las pruebas con concentración de solvente constante, pruebas 1 a 5.
- (3) Compósito de los productos de las pruebas con concentración de catalizador constante, pruebas 6 a 10.
- (4) Producto de la prueba de confirmación.

El equipo IR utilizado fue el equipo modelo SHIMADZU 8300 FTIR, usando la técnica de Reflectancia Difusa, en el rango de número de onda 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Para cada análisis se tomó 29mg de muestra y 0.1mg de KBr

Las características del equipo empleado son:

FIGURA Nº 6.10

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO SHIMADZU 8300 FTIR

Modelo	FTIR-8700	FTIR-8300
Interferómetro	Tipo Michelson con ángulo de incidencia 30°; desecado y sellado; con sistema de alineación dinámica.	
Sistema Optico	de simple haz	
Divisor de haz	placa de KBr revestida con Germanio	
Fuente de luz	Cerámica	
Detector	DLATGS de alta sensibilidad con temperatura controlada	
Señal/Ruido	mayor que 3200:1 (placa KRS-5, 4cm <sup>-1</sup> , 4 segundos, alrredador de 2200cm <sup>-1</sup> , P-P) Nota 1	
Rango de números de onda	7800cm <sup>-1</sup> ~350cm <sup>-1</sup>	
Resolución	0.5, 1, 2, 4, 8, 16cm <sup>-1</sup>	1, 2, 4, 8, 16cm <sup>-1</sup>
Velocidad del espejo	3 pasos: 2.8mm/sag, 5mm/sag, 9mm/sag	
Muestreo de datos	mediante láser He-Ne	
Compartimiento de muestras	200x230x170 mm	
Funciones de Procesamiento de Datos	Cálculos aritméticos, búsqueda de picos, sustracción de espectros, suavización, corrección de línea de base, corrección de datos, normalización, conversión Kubalka-Munk, análisis Kramers-Kroning, corrección ATR, transformadas de Fourier, derivadas, conversión transmitancia-absorbancia, integración de áreas de picos, cálculo de relación de picos, corrección por emisión, deconvolución, cuantificación, cuantificación por regresión multilíneal, búsqueda de espectros en bibliotecas, conversión JCAMP, conversión ASCII, conversión logarítmica, conversión longitud de onda / número de onda, desplazamiento en el eje X Nota 2	
Programas Opcionales	Cuantificación PLS quantitation, ajuste de curvas, programa de mapeo, programación de macros (BASIC)	
Programa de Validación	Se provee como estándar El "auto-shutter" de poliestireno para uso en modo totalmente automático es opcional.	
Condiciones Operativas	Temperatura: 15°C a 30°C, Humedad: menor que 70%	
Alimntación Eléctrica	AC 100 a 230V, 50/60Hz, 160VA	

1. La fórmula para determinar la relación S/R para 1 minuto a partir de la S/R para 4 segundos, de acuerdo con la teoría es la siguiente:  $S/R \text{ 1 min} = 3.87 \times S/R \text{ 4 sec}$   
Usando esta fórmula se obtiene un valor de  $3200 \times 3.87 = 12384$
2. Se dispone también de la versión "Hyper-IR compact" sin búsqueda en bibliotecas, cuantificación y cuantificación por regresión multilíneal.

Fuente: DEXIN. Equipos e Instrumental. (2010). Disponible en <http://www.dexin.com.uy/htdocs/productos/shimadzu/espectrofotometros/infrarojo.htm>



**FIGURA Nº 6.11**  
**ESTRUCTURA DEL BHET**



Fuente: López Fole, Marta. 2006. Estudio comparado de procesos para el reciclado químico de PET. España, p.32.

Observando la molécula del BHET se observa la presencia de los siguientes grupos estructurales con frecuencias activas en el espectro IR (Ver anexo A3.3):

- **-OH**, grupo alcohólico terminal  
 $\nu = 3550 - 3450 \text{ cm}^{-1}$
- **-CH-**, cadena alquílica en el grupo éster del etileno  
 $\nu = 2962 - 2877 \text{ cm}^{-1}$
- **C=O**, éster carbonílico  
 $\nu = 1730 - 1717 \text{ cm}^{-1}$
- **C-O**, vibración éster asimétrica  
 $\nu = 1274-1253 \text{ cm}^{-1}$
- **C-O**, vibración éster simétrica  
 $\nu = 1134-1072 \text{ cm}^{-1}$
- **C-H**, posición -Para en el anillo aromático  
 $\nu = 810-840 \text{ cm}^{-1}$

Analizando los espectros obtenidos IR:

FIGURA N° 6.12

Muestra Prueba Cero

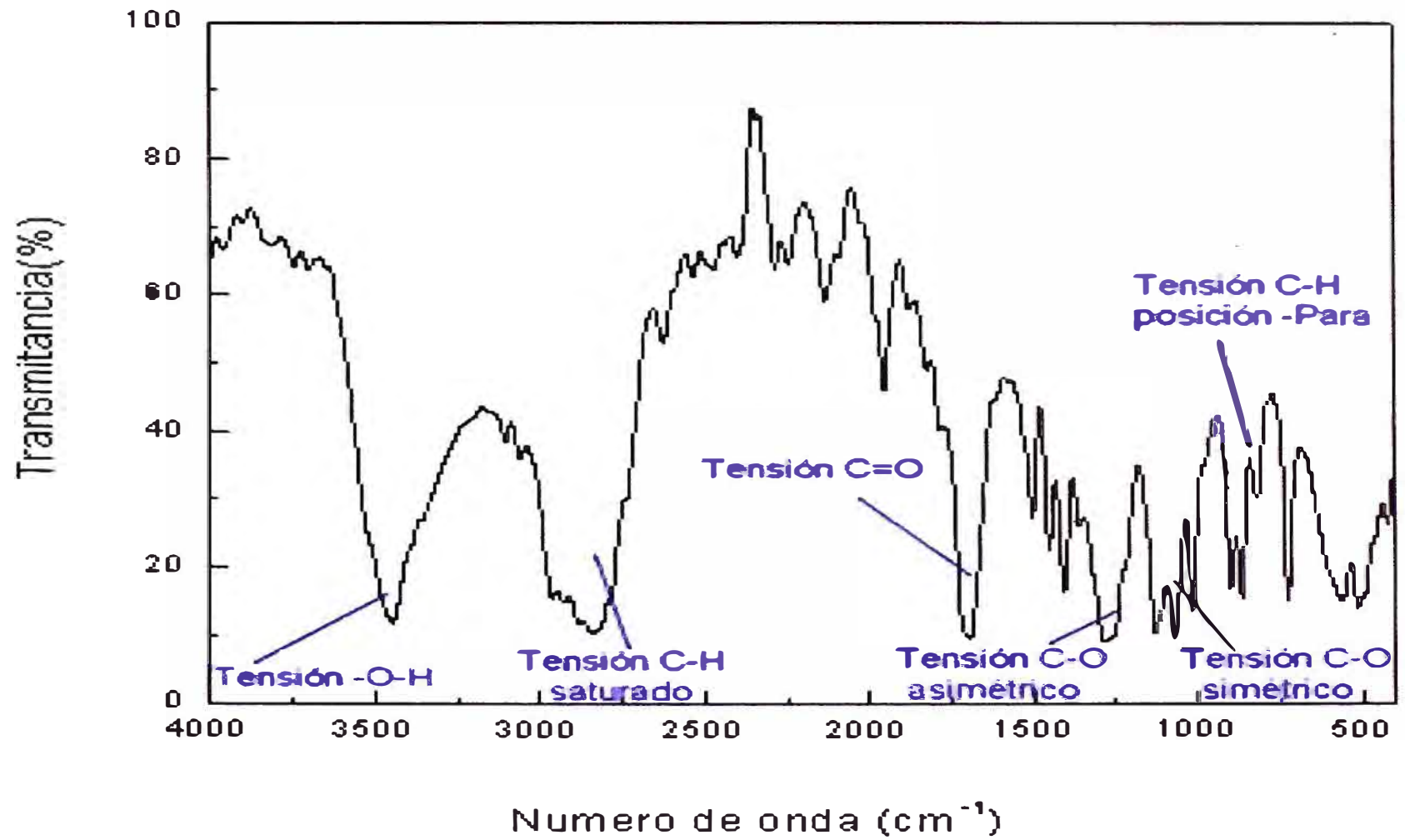


FIGURA N° 6.13

Muestra Compósito Pruebas 1-5

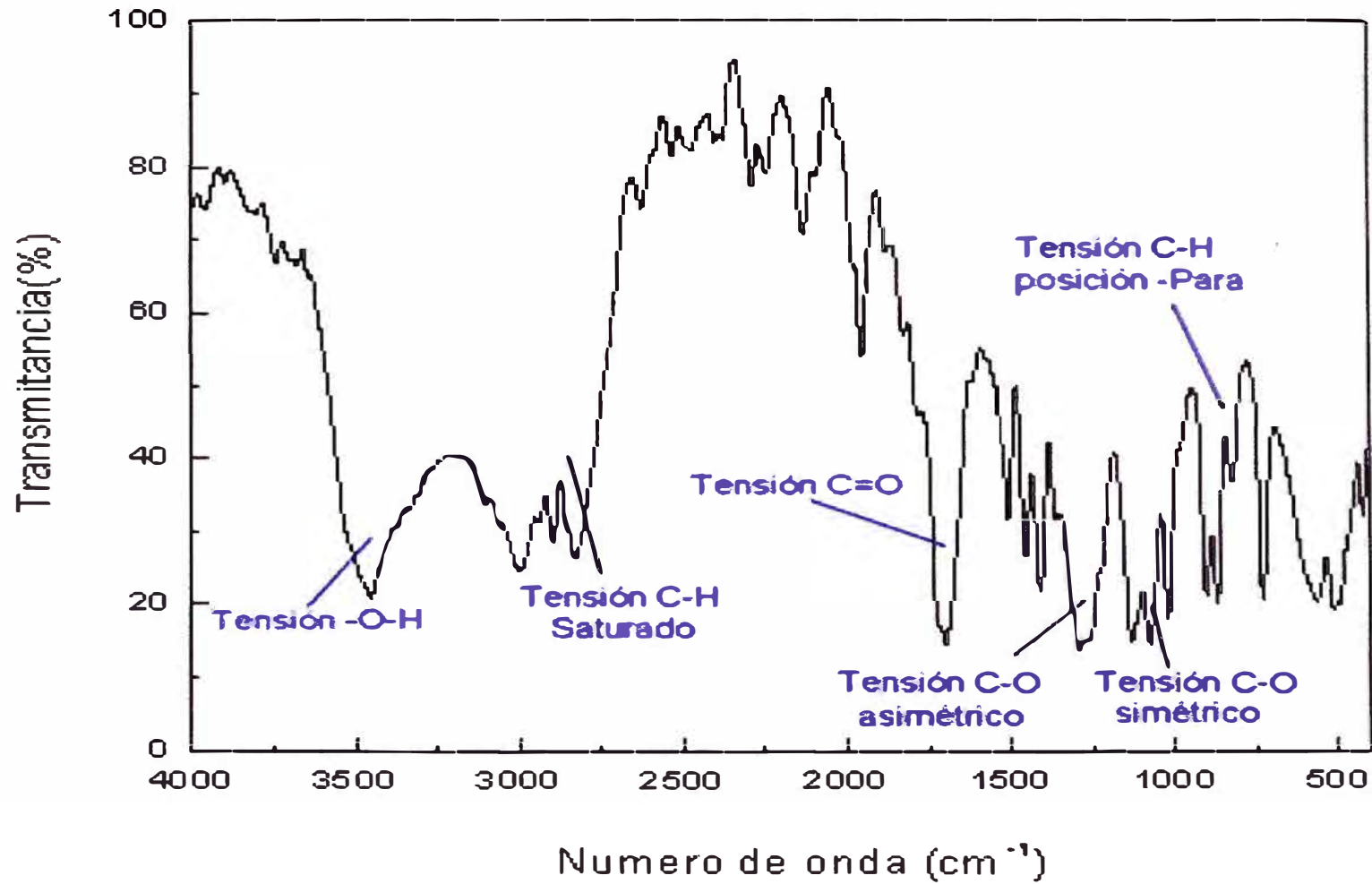


FIGURA N° 6.14

Muestra Compósito Pruebas 6-10

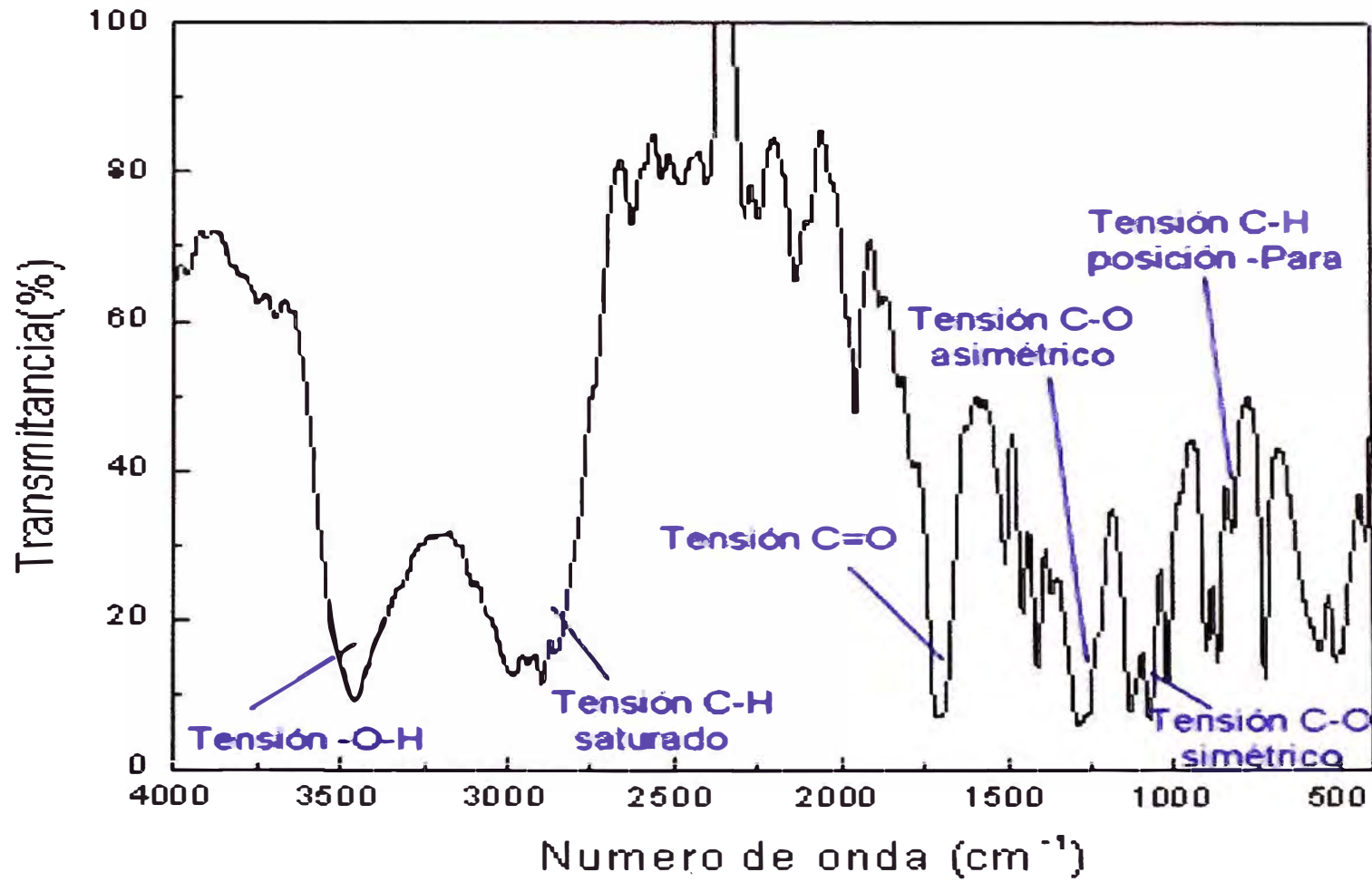
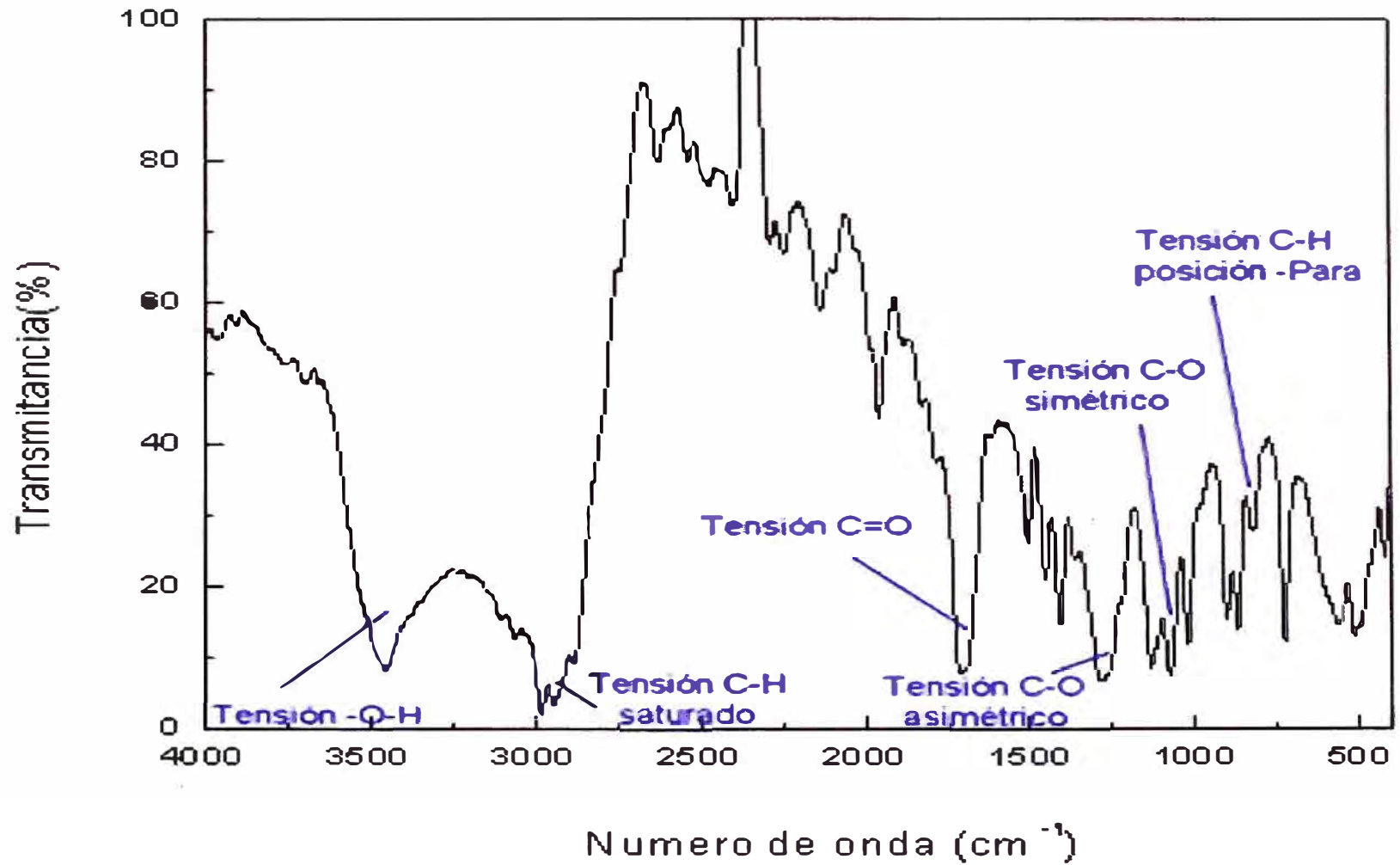


FIGURA N° 6.15

Muestra Prueba Confirmación



Se observa que todos los espectros son similares. Todos muestran las bandas características del BHET y sugieren que efectivamente, se trata del producto esperado. Para confirmar su identidad, se determina el punto de fusión de los productos.

### **Análisis del punto de fusión**

La identificación del producto se complementa con la determinación del punto de fusión de los cristales obtenidos. Se analizaron las siguientes muestras:

- (1) Muestra A - Compósito de los productos de las pruebas con concentración de solvente constante, pruebas 1 a 5.
- (2) Muestra B - Compósito de los productos de las pruebas con concentración de catalizador constante, pruebas 6 a 10.
- (3) Muestra C - Producto de la prueba de confirmación.

Las pruebas de análisis del punto de fusión se llevaron a cabo en el Laboratorio N° 12 de la Facultad de Ciencias de la UNI (ubicado en la Facultad de Ingeniería Química y Textil), siendo los resultados:

- |               |       |
|---------------|-------|
| (1) Muestra A | 106°C |
| (2) Muestra B | 107°C |
| (3) Muestra C | 106°C |

El punto de fusión determinado fue de 106-107°C (106-109°C según Sigma-Aldrich).

De los resultados del análisis del espectro IR y del valor del punto de fusión, queda establecida la identidad del sólido obtenido, que corresponde al producto Bis hidroxietil tereftalato, BHET.

## **6.4 Estudio de la cinética de la reacción**

El estudio de la cinética de la reacción se realizó en la prueba de confirmación a las condiciones óptimas encontradas. En ésta, se tomaron muestras cada 10 minutos, a partir de la primera media hora de iniciado el proceso de reacción.

En la ecuación 4.14 se muestra la expresión de velocidad de glicólisis de PET:

$$\frac{1}{[EG]} \cdot \ln\left(\frac{1}{1-X}\right) = k_G \cdot t + C \quad \dots \text{ Ec. 4.14}$$

Donde las diferentes expresiones equivalen a:

t es el tiempo de reacción, en min

X es la conversión de PET

$k_G$  es la constante de velocidad de la reacción de glicólisis, en  $l \cdot mol^{-1} \cdot min^{-1}$

[EG] es la concentración de etilenglicol, en mol/l.

C es una constante resultante de integración, cuyas unidades son  $l \cdot mol^{-1}$ .

En cuanto al desarrollo de la expresión de velocidad de reacción, considerando que el EG está en exceso, su concentración se puede considerar constante a lo largo de la reacción.

A partir de datos experimentales obtenidos, para la reacción de glicólisis de PET a 197°C y 1 atm, se extraen datos para el cálculo del ajuste de la expresión de la velocidad:

Densidad de la mezcla = 1.110g/ml

[EG] = 15.12 mol/l

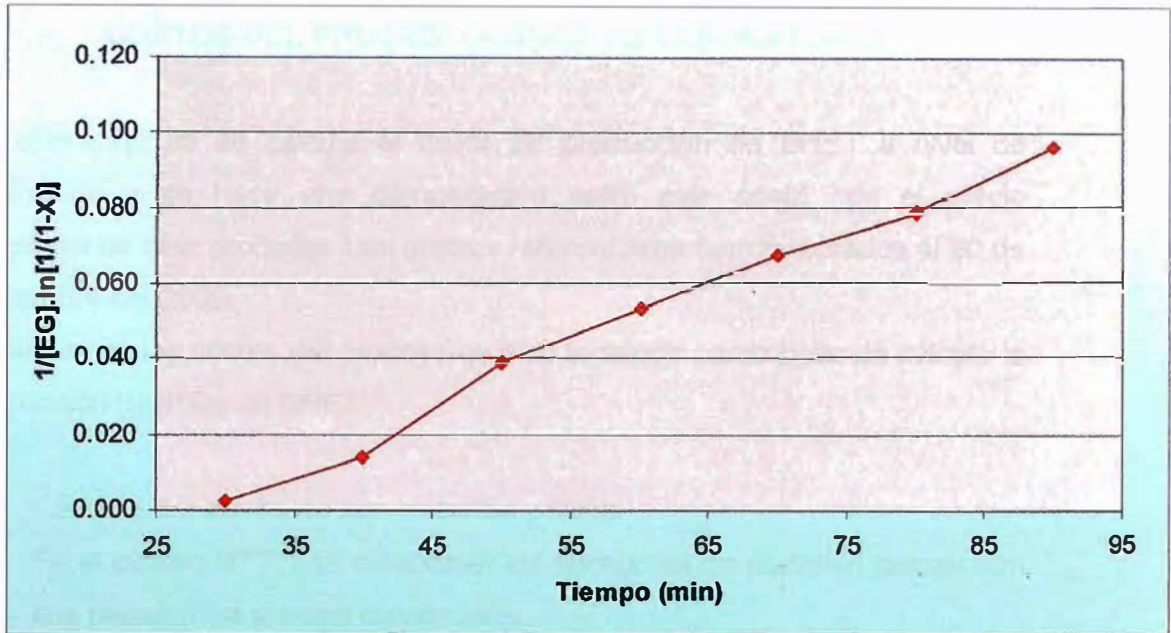
$V_{muestra} = 10ml$

**CUADRO N° 6.14**  
**RESULTADOS EN PRUEBA DE CINÉTICA DE REACCIÓN**

t (min)	$W_{PETW,unr}$ (g)	X	X %	$1/(1-X)$	$\ln[1/(1-X)]$	$1/[EG] \cdot \ln[1/(1-X)]$
30	<b>1.4495</b>	0.035	3.50	1.036	0.036	0.002
40	<b>1.2179</b>	0.189	18.92	1.233	0.210	0.014
50	<b>0.8321</b>	0.446	44.60	1.805	0.591	0.039
60	<b>0.6741</b>	0.551	55.12	2.228	0.801	0.053
70	<b>0.5391</b>	0.641	64.11	2.786	1.025	0.068
80	<b>0.4545</b>	0.697	69.74	3.305	1.195	0.079
90	<b>0.3488</b>	0.768	76.78	4.306	1.460	0.097

Elaboración propia

**FIGURA N° 6.16**  
**AJUSTE DE EXPRESIÓN DE VELOCIDAD**



Elaboración propia

Se puede observar que con los datos calculados se obtiene una recta, cuya ecuación y coeficiente de regresión son respectivamente:

$$\frac{1}{[EG]} \cdot \ln\left(\frac{1}{1-X}\right) = 0.0016t - 0.0444 \quad R^2 = 0.991$$

$$\sigma = 0.0342$$

La pendiente de la recta coincide con la constante de velocidad de la reacción de glicólisis,  $k_G$ , y es igual a  $0.0016 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ .



## CAPÍTULO VII

### COSTOS DEL PROCESO A NIVEL DE LABORATORIO

En este capítulo se calcula el costo de producción de BHET a nivel de laboratorio y se hace una comparación entre este costo con el precio comercial de este producto. Los precios referenciales fueron tomados al 30 de noviembre del 2009.

El cálculo de los costos del proceso se hizo tomando como base de cálculo la producción de 100g de BHET.

#### 7.1 Cálculo del costo de las materias primas

En el cuadro N° 7.1 se relacionan los consumos de materias primas con sus respectivos precios comerciales.

**CUADRO N° 7.1**  
**NECESIDADES Y PRECIO DE LA MATERIA PRIMA**

Sustancia	Cantidad Utilizada		Precio US\$
	ml	g	
Pet acondicionado		98.82	1.98 <sup>(1)</sup>
Etilénglicol	571.37		22.85 <sup>(2)</sup>
Acetato de zinc		13.84	0.75 <sup>(2)</sup>

(1) Precio referencial de costo

(2) Precio en distribuidoras locales

Elaboración propia

Las necesidades se calcularon a partir de los cuadros N° 6.11 y N° 6.12, a partir de los datos de la prueba de confirmación.

##### 7.1.1 PET acondicionado

En total se necesitan 98.82 gramos de PET para la depolimerización. El precio del pet molido y acondicionado para el proceso es de 20 US\$ por kg de PET. El precio referencial

incluye recolección, molienda, separación de impurezas, tamizado, lavado con soda cáustica, filtración y secado.

$$\$_{PET} = (98.82/1000)*20$$

$$\$_{PET} = 1.98 \text{ US\$}$$

### 7.1.2 Etilénglicol

Se necesitan 571.37ml (617.65g) de etilenglicol QP. El precio comercial del EG para análisis es de 40 US\$/l.

$$\$_{EG} = (571.37/1000)*40$$

$$\$_{EG} = 22.85 \text{ US\$}$$

### 7.1.3 Acetato de Zinc

Se requieren 13.84g de AcZn QP. El precio comercial del AcZn para análisis es de 54 US\$/kg.

$$\$_{AcZn} = (13.84/1000)*54$$

$$\$_{AcZn} = 0.75 \text{ US\$}$$

## 7.2 Cálculo del costo de la energía de los equipos utilizados

El procedimiento experimental incluye el uso de un agitador magnético con calefacción eléctrica para llevar a cabo la reacción, una bomba de vacío para la filtración y el uso de un sistema de refrigeración para cristalizar el producto BHET.

A continuación se calcula individualmente estos costos.

### 7.2.1 Costo de la energía de calefacción

El agitador magnético con calefacción eléctrica empleado consume 1170W de potencia.

Calculando el costo de la energía utilizada:

$$\text{Consumo} = \text{Potencia} * \text{tiempo}$$

$$\text{Consumo} = 1170W * 90 \text{ min} * \left( \frac{1h}{60 \text{ min}} \right) * \left( \frac{1kW}{1000W} \right)$$

$$\text{Consumo} = 1.755 \text{ kWh}$$

$$\text{Costo}_{\text{energía}} = \text{Consumo} * \text{precio}$$

$$\text{Costo}_{\text{energía}} = 1.755\text{kWh} * 0.327\text{US\$/kWh}$$

$$\text{Costo}_{\text{energía}} = 0.58 \text{ US\$}$$

### 7.2.2 Costo de la energía de filtración

Para las operaciones de filtración se utilizó una bomba de vacío tipo diafragma de 230W de potencia. El uso promedio total estimado de la bomba para la operación es de 180 minutos.

Calculando el costo de la energía utilizada.

$$\text{Consumo} = \text{Potencia} * \text{tiempo}$$

$$\text{Consumo} = 230W * 180 \text{ min} * \left( \frac{1h}{60 \text{ min}} \right) * \left( \frac{1kW}{1000W} \right)$$

$$\text{Consumo} = 0.69 \text{ kWh}$$

$$\text{Costo}_{\text{energía}} = \text{Consumo} * \text{precio}$$

$$\text{Costo}_{\text{energía}} = 0.115\text{kWh} * 0.327\text{US\$/kWh}$$

$$\text{Costo}_{\text{energía}} = 0.23 \text{ US\$}$$

### 7.2.3 Costo de la energía de refrigeración

Se necesita enfriar de 16-20 horas a 5-8°C la solución filtrada para acelerar la formación de cristales de BHET. Este proceso se lleva a cabo en una refrigeradora convencional que consume 115W de potencia.

Calculando el costo de la energía utilizada.

$$\text{Consumo} = \text{Potencia} * \text{tiempo}$$

$$\text{Consumo} = 115W * 1200 \text{ min} * \left( \frac{1h}{60 \text{ min}} \right) * \left( \frac{1kW}{1000W} \right)$$

$$\text{Consumo} = 2.3 \text{ kWh}$$

$$\text{Costo}_{\text{energía}} = \text{Consumo} * \text{precio}$$

$$\text{Costo}_{\text{energía}} = 2.3\text{kWh} * 0.327\text{US\$/kWh}$$

$$\text{Costo}_{\text{energía}} = 0.752 \text{ US\$}$$

### 7.3 Costos totales

Para calcular los costos totales se suma el costo de la materia prima y de los reactivos involucrados (etilenglicol y acetato de zinc), así como las necesidades energéticas del proceso.

$$\text{COSTO}_{\text{Producto}} = \$_{\text{PET}} + \$_{\text{EG}} + \$_{\text{AcZn}} + \$_{\text{Energía Eléctrica}}$$

$$\text{COSTO}_{\text{Producto}} = 1.98 + 22.85 + 0.75 + (0.58 + 0.23 + 0.752)$$

$$\text{COSTO}_{\text{Producto}} = 28 \text{ US\$/100g BHET}$$

Para efectos de estimación, se va a considerar que el costo de producción total es 15% más que el costo de producto (López, 2006, Anexo p. 109-110), es decir:

$$\text{COSTO}_{\text{Producción Total}} = 32 \text{ US\$/100g BHET}$$

### 7.4 Análisis económico

De acuerdo al proveedor local JAS Importaciones SAC, el precio del Bis hidroxietil Tereftalato, BHET, en presentación de 100g importado de la Compañía Sigma – Aldrich, tiene un valor de 94US\$.

Si comparamos este valor con el costo de producción total calculado, se aprecia claramente que el proceso sí es rentable a escala de laboratorio, pues el costo del BHET importado es 62US\$ menos que el costo de producción a partir del PETW, es decir, 65% menos.

Como se puede apreciar la mayor parte de los costos proviene de la materia prima y los reactivos utilizados en las diferentes etapas del proceso. Cabe destacar que el relativo bajo costo de la materia prima, se debe en gran medida a la existencia de recolectores informales de residuos plásticos tipo PET que comercializan este material a precios que oscilan de 1.8 – 2.5 soles por kilogramo en el mercado local, de acuerdo a las temporadas establecidas por los patrones de consumo de la población; estos precios están muy por debajo de los precios en otros países de Latinoamérica y Europa. Para futuras investigaciones del tema y estudios de viabilidad económica se debe tener en cuenta este factor, pues el efecto de una eventual formalidad de estos comercializadores, y por lo tanto del aumento de precio del PETW, afectaría el costo de la materia prima a escala industrial de este proceso, cuyo efecto debe cuantificarse.

En este proceso desarrollado a nivel de laboratorio no se ha considerado la recuperación de EG por destilación, puesto que escapaba a los objetivos de este trabajo, pero cuyo costo debe considerarse en un proceso a nivel industrial, puesto que el EG excedente puede recuperarse y recircularse al proceso de reacción lo que tendría un efecto beneficioso en la factibilidad económica.

El costo de la energía del proceso es casi insignificante comparado con los otros costos, por lo tanto también resultaría útil realizar una destilación (en el proceso a nivel industrial) en una posterior fase de separación del EG para recuperarlo ya que es una materia prima que genera un alto costo con respecto a la energía que se utilizaría en la destilación de éste.

## CONCLUSIONES

- En el reciclado químico vía glicólisis del PET, la reactividad del grupo éster presente en el polímero permite su depolimerización sin el uso de condiciones excesivamente severas de temperatura para velocidades de reacción adecuadas y conversiones elevadas, siempre utilizando un reactivo en exceso (solvente). Las pruebas se llevaron a cabo a presión atmosférica, una temperatura de 195-197°C durante 90 minutos con una velocidad de agitación de 450rpm. El tamaño de partícula del PETW en las pruebas fue menor a 150µm.
- La materia prima empleada corresponde al polietilén tereftalato. Se caracterizó por su peso molecular (17035 g/mol) y por sus propiedades de densidad (1.44 g/cm<sup>3</sup>) y punto de fusión (253 °C), cuyos valores coinciden con los descritos en la literatura.
- Los espectros IR y los valores del punto de fusión (106-107°C) confirman que el producto obtenido corresponde al monómero bis(hidroxietil) tereftalato.
- Los resultados de las pruebas realizadas muestran que la variación de las condiciones de concentración de solvente y catalizador, sí influyen en la eficiencia de la depolimerización por glicólisis en fase líquida del polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima, para la obtención de bis(hidroxietil) tereftalato, logrando un rendimiento del 76.49%.
- Sí existe una concentración óptima de etilenglicol como solvente en la depolimerización por glicólisis en fase líquida de polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima. La relación en peso EG:PET (w:w) óptima es de 6.25:1.
- Sí existe una concentración óptima de acetato de zinc como catalizador en la depolimerización por glicólisis en fase líquida de polietilén tereftalato residual presente en los RSU de la ciudad de Lima. La relación en peso AcZn:PET (w:w) óptima es de 14:100.

- El modelo cinético desarrollado fue correlacionado con los datos experimentales para validarlo. Dicho modelo muestra una muy buena relación con los datos experimentales. La constante de la velocidad de reacción es  $0.0016 \text{ l}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ , con un coeficiente de regresión del modelo igual a 0.991 y una desviación estándar de 0.0342.
- El proceso de obtención de BHET a partir de PETW es rentable a escala laboratorio. El costo de fabricación de este producto es de 32US\$/100g, mientras que el precio del mismo producto importado es de 94US\$/100g, es decir, 65% menos.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el diseño completo del proceso, así como un estudio sobre la factibilidad técnico-económica de una planta de glicólisis de plásticos PET en el Perú, ya que éste es un proceso que permitiría impulsar una industria propia de resinas PET y a la vez constituye una tecnología alternativa para el reciclaje de este tipo residuos.
- Las investigaciones sobre reciclaje químico para otros tipos de plásticos en el Perú son prácticamente nulas, por lo que las universidades y centros de investigación deberían empezar a mirar a este tipo de procesos como una alternativa para solucionar la problemática de los residuos plásticos domésticos e industriales del país.
- La tendencia mundial del reciclaje apunta a la búsqueda de diversos procesos que permitan consolidar el desarrollo sostenible en el planeta, por este motivo es importante plantear alternativas desde los centros académicos, basándose en un entorno determinado para controlar la contaminación causada por estos materiales. Este trabajo es un punto de partida para buscar opciones que sean aplicables a la industria peruana, de tal manera que se pueda cubrir efectivamente la demanda del PET y pueda ser una oportunidad para crear empresa y generar empleo para el desarrollo del país.



## BIBLIOGRAFÍA

- ABU BAKAR, Dayang; AHMAD, Ishak y RAMLI, Anita. (2006). "Reciclaje químico de PET residual desde botellas de bebidas para producir resinas de polyester termoestables" en la Revista Química de Malasia. Vol. 8, Nº1. p. 22-26.
- ARANDES, José M.; BILBAO, Javier; LÓPEZ, Danilo. (2004). "Reciclado de residuos plásticos" en la Revista Iberoamericana de Polímeros, Vol. 5, México. p. 28, 31.
- BALIGA, S., W., T. WONG. (1989). "Depolimerización de PET reciclado proveniente de botellas de post-consumo en la Revista de Ciencia de Polímeros", Vol. 27, USA. p. 2071-2082.
- CHEN, C. H. (2003). "Estudios de glicólisis del polietilén tereftalato reciclado de botellas de bebida post-consumo. Influencias de las condiciones de la glicólisis", en la Revista Ciencia de la Aplicación de Polímeros, Vol. 87, USA. p. 2004-2010.
- CHEN, J.Y., OU, C.F., HU, Y.C., & C.C. LIN. (1991). "Depolimerización de resina PET a altas presiones", en la Revista Ciencia de la Aplicación de Polímeros, Vol. 42, USA. p. 1501.
- CHUNG PINZÁS, Alfonso (2003). "Análisis económico de la ampliación de la cobertura del manejo de residuos sólidos por medio de la segregación en la fuente en Lima Cercado". Tesis para optar el grado académico de Magíster en Ingeniería Industrial. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. p. 71.
- CÓRDOVA, Daniel (2004). "La industria de plásticos en el Perú: Entre la conquista del mercado externo y la competencia desleal". Reporte Sectorial, Departamento de Estudios Económicos, Banco Wiese Sudameris, Perú. p. 3-7.
- CORNELL, D.D. (2003). "Reciclaje de poliésteres por depolimerización química: química y tecnología de poliésteres y copoliésteres". Editorial John Wiley & Sons, Ltd. New York, USA., p. 567.
- EKART, M.P., MURDOCH, Jr., W. S., PELL, Jr. (2002). "Procesos de glicólisis para reciclaje de PET post-consumo". Patente US 6,410,607. T. M., Eastman Chemical Company. USA.

- EKART, M.P., PELL, Jr. (1997). "Procesos con glicólisis y subsecuente purificación para reciclar materiales polyester". Patente US 5,635,584. T. M, Eastman Chemical Company. USA.
- ERTAS, Kamile, GÜCLÜ, Gamze. (2005). "Resinas alquídicas sintetizadas desde productos de la glicólisis de PET residual", en la Revista Tecnología e Ingeniería de Polímeros Plásticos. Turquía. p. 783-794.
- FAKYROV, S. (2002). "Manual de poliésteres termoplásticos". Editorial John Wiley & Sons. USA. p.61.
- FERSHT, Alan. (1980). Estructura y mecanismo de los enzimas. Volumen 6, Serie de Biología fundamental. Editorial Reverté. USA. p.37-38.
- GOJE, A.S., MISHRA, S. (2003). "Cinética química, simulación y termodinámica en la depolimerización glicolítica del polietilén tereftalato residual con optimización del catalizador para el reciclaje de productos monoméricos con valor agregado" en la revista Materiales macromoleculares y de ingeniería. Vol. 288. p. 320-336.
- GOJE, A.S., THAKUR, S.A., CHUAHAN Y.P., PATIL, T.M., PATIL, S.A., DIWARE V.R. & MISHRA, S. (2005). "Glicólisis aminolítica de de Polietilén Tereftalato residual a presión atmosférica para recuperar insecticidas con valor agregado", en la Revista Tecnología e Ingeniería de Polímeros Plásticos, Vol. 44. USA. p. 163.
- GRUPO TÉCNICO NACIONAL SOBRE GESTIÓN AMBIENTAL DE EMPAQUES RÍGIDOS PARA PRODUCTOS DE CONSUMO MASIVOS. (2005). Informe Final. Lima, Perú. p. 18.
- GRZEBIENIAK, Karolina; WESOLOWSKI, Jacek. (2004). "Glicólisis de PET residual y uso d productos glicolíticos en la síntesis de fibras copoliésteres degradables", en la Revista Fibras y Textiles en Europa Occidental. Vol. 12, 2. p. 21.
- GUÍA AMBIENTAL – SECTOR PLÁSTICOS (2004). "Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo". Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Vice ministerio de Ambiente, Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible, Colombia. p. 20-21

- HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO, Pilar. (1998). "Metodología de la investigación". Editorial McGraw.Hill. Segunda edición. México. p. 203-215.
- LAWTON, E. L.; RINGWALD, E. L. (1989). "Constantes Físicas del PET". En Manual de Polímeros; BRANDRUP, J. Editorial John Wiley & Sons, New York; USA. p. 101-105.
- LÓPEZ FOLE, Marta. (2006). "Estudio comparado de procesos para el reciclado químico de PET". Proyecto de fin de carrera. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Politécnica de Cataluña, España. p.30-37. Anexo, p. 27-30.
- MALIK, A., MOST, E. (1978). "Proceso para depolimerizar polietilén tereftalato residual". Patente US 4,078,143. E. I. DuPont de Nemours & Company. USA.
- MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN – PRODUCE. (2008). Boletín estadístico mensual 2000 – 2008. Departamento de Publicaciones, Dirección General de Industria, Perú. p. 35-54.
- MISSEN, Ronald; MIMS, Charles; SAVILLE, Bradley. (1999). "Introducción a la ingeniería y cinética de las reacciones químicas". Editorial. John Wiley & Sons, Inc. USA. p. 182-186.
- MORAL, A., IRUSTA, R., MARTÍN, J.M. y MARTÍNES, L. (2003). "Depolimerización de botellas residuales para producir el monómero BHET usando etilenglicol". Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Ambiental, Universidad de Valladolid, España. p.3-4.
- MOSER, W. R., SLOCUM, D. W. (1992). "Reacciones homogéneas catalizadas por metales de transición". Editorial ACS, Washington DC. USA. p. 136-139.
- OSTROWSKI, H.S. (1975). "Depolimerización atmosférica continua de polyester". Patente US 3,884,850. Fiber Industries, Inc. USA.
- PATTERSON, Joan Diana. (2007). "Depolimerización continua de polietilén tereftalato vía extrusión reactiva". Tesis optar el Grado de de Ph.D., Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Carolina del Norte, USA. p. 7-9,14-17.

- PRETSCH Ernoe, BUHLMANN, Philippe, AFFOLTER, Christian. (2000). "Determinación de la estructura de compuestos orgánicos. Tablas de espectros". Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York. USA. P.13-17.
- RAMÍREZ ARISTIZABAL, Juan Diego; ROBLEDO FRNCO, Juan Carlos. (2004). "Depolimerización de polietilén tereftalato (PET) como alternativa de reciclado". Tesis de grado para optar al título de Ingeniero de Procesos. Departamento de Ingeniería de Procesos, Escuela de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. p. 25-29.
- RUIZ MALDONADO, Olga. (2005). "La relación entre el peso molecular y el comportamiento viscoelástico de fibras de poliéster". Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Textil. Escuela Superior de Ingeniería Textil. Instituto Politécnico Nacional. México. p.26-30.
- SARDÓN DE TABOADA, Francisco (2006). "Sector de bebidas gaseosas. Reporte Especial". Departamento de Estudios Económicos, Scotiabank, Perú. p. 1-3.
- SARDÓN DE TABOADA, Francisco (2007). "Sector de bebidas gaseosas. Reporte Especial". Departamento de Estudios Económicos, Scotiabank, Perú. p. 1-2.
- SEYMOUR, R. B. (1988). "Los polímeros están en todas partes", en la Revista de Educación Química, vol. 65. USA. p.327-332.
- SHUKLA, S.R., KULKARNI, K.S. (2002). "Depolimerización de polietilén tereftalato residual", en la Revista Ciencia de la Aplicación de Polímeros, vol. 85. USA. p. 1765-1770.
- SMITH, Gerard & NOTHEISZ, Ferenc. (2000). "Catálisis heterogénea en química orgánica". Editorial Elsevier, USA. p.3.
- SOCIEDAD NACIONAL DE INDUSTRIA (Mayo 2008). "Revista Institucional de la Sociedad Nacional de Industrias". Edición N° 822 – 823, Mayo – Junio. Perú. p. 65.
- SOCIEDAD NACIONAL DE INDUSTRIA (Agosto 2008). "Revista Institucional de la Sociedad Nacional de Industrias". Edición N° 825, Agosto. Perú. p. 18-20.

- THORNTON MORRISON, Robert; NEILSON BOYD, Robert. (2002). "Química orgánica". Editorial Prentice-Hall, sexta edición. India. p.412-445.
- TROEV, K., GRANCHAROV, G., TSEVI, R., GITSOV, I. (2003). "Un Nuevo catalizador para la glicólisis del polietilén tereftalato", en la Revista Ciencia de la Aplicación de Polímeros, vol. 90. USA. p. 1148.1152.
- VAIDYA, U.R., NADKARNI, V. M. (1989). "Poliéster poliólicos como producto de la glicólisis de PET residual: Efecto del tipo de glicol en la cinética de la poliesterificación", en la Revista Ciencia de la Aplicación de Polímeros, vol. 38. USA. p. 1179-1190.
- VAIDYA, U.R., NADKARNI, V. M. (1987). "Poliésteres insaturados desde PET residual: Cinética de la policondensación", en la Revista Ciencia de la Aplicación de Polímeros, vol. 34. p. 235-245.
- VAN SANTEN, R. A. & NEUROCK, M. (2006). "Catálisis Heterogénea Molecular". Editorial Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania. p. 20-34, 267.
- VITKAUSKIENĖ, Irena & MAKUŠKA, Ričardas (2008). "Glicólisis industrial de polietilén tereftalato residual para obtener bishidroxiethyl tereftalato y polyester poliólicos aromáticos", en la Revista del Departamento de Química de Polímeros de la Universidad Vilnius, Vol 19, Nº 2. Lituania. p. 29-34.
- WADE, L.G. Química Orgánica. (1993). Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., Segunda Edición. México. p.1269-1270.
- XI, G., LU, M., SUN, C. (2005). "Depolimerización de PET residual en monómeros de BHET", en la Revista de estabilización y agregación de polímeros, vol. 87. USA. p. 117-120.
- YAMAMOTO, H. (1999). "Ácidos Lewis como reactantes. Un acercamiento práctico". Editorial University Press, Oxford. USA. p.127.
- ZOPE, V. S; DR S MISHRA, V S PATIL, K K AGRAWAL, J P MAHAJAN & S A FIRKE. (2002). "Estudio de la degradación del polietilén tereftalato residual usando técnicas de autoclave", Departamento de Tecnología Química, Universidad Maharashtra del Norte. India. p.45.

## DOCUMENTOS ELECTRÓNICOS

- Agencia de Aduanas del Perú. (2009). [Citado: 10 Octubre de 2009]. Disponible en la World Wide Web:  
<http://www.aduanet.gob.pe/operatividadAduana/index.html>
- Dexin. (2010). Equipos e Instrumental – Espectrofotómetros Infrarrojos por Transformadas de Fourier. [Citado: 26 Enero de 2010]  
<http://www.dexin.com.uy/htdocs/productos/shimadzu/espectrofotometros/infrarojo.htm>
- Sistema Nacional de Información Ambiental. (2009). Residuos sólidos generados en los distritos de la provincia de Lima, 2000-2008 [Citado: 26 Octubre de 2009]. Disponible en la World Wide Web:  
<http://sinia.minam.gob.pe/index.php?accion=verListTipoEstadistica&idGrupo=3>
- Sistema Nacional de Información Ambiental. (2009). Residuos sólidos generados según distrito de la provincia de Lima, 2007 [Citado: 26 Octubre de 2009]. Disponible en la World Wide Web:  
<http://sinia.minam.gob.pe/index.php?accion=verListTipoEstadistica&idGrupo=3>

**ANEXOS**

**ANEXO N° 01**  
**MANUAL DE OPERACIÓN DEL AGITADOR MAGNÉTICO CIMAREC**





# Cimarec™ Stirring Hot Plates

## OPERATION MANUAL AND PARTS LIST

<b>Model #</b>	<b>Top Plate Size</b>	<b>Voltage</b>
SP131014	4x4	100
SP131015	4x4	120
SP131010-33	4x4	220-240
SP131324	7x7	100
SP131325	7x7	120
SP131320-33	7x7	220-240
SP131634	10x10	100
SP131635	10x10	120
SP131630-33	10x10	220-240

# Table of Contents

Safety Information .....	3
Warnings .....	3
Specifications .....	5
Heating Specifications .....	6
Stirring Speed Specifications .....	6
Environmental Conditions .....	7
Declaration of Conformity.....	7
Introduction.....	8
General Usage .....	8
Principles of Operation.....	9
Unpacking and Installation .....	10
Unpacking .....	10
Installation .....	10
Operation .....	11
Setting the Stirring Speed .....	11
Setting the Temperature.....	12
To Achieve Fast Heat-Up of Large Volumes .....	12
Heating Small Volumes .....	12
Heating Metal Vessels and Sand Baths.....	13
Maintenance.....	14
General Cleaning Instructions .....	14
Troubleshooting .....	15
Error Codes .....	15
Exploded Views .....	16
Wiring Diagram.....	22
Replacement Parts.....	23
Accessories .....	23
Ordering Procedures .....	24
Warranty .....	25

Alert



# Safety Information

## Alert Signals



### Warning

Warnings alert you to a possibility of personal injury.



### Caution

Cautions alert you to a possibility of damage to the equipment.



### Note

Notes alert you to pertinent facts and conditions.



### Hot Surface

Hot surfaces alert you to a possibility of personal injury if you come in contact with a surface during use or for a period of time after use.

Your Barnstead|Thermolyne Cimarec Stirring Hot Plate has been designed with function, reliability, and safety in mind. It is your responsibility to install it in conformance with local electrical codes. For safe operation, please pay attention to the alert signals throughout the manual.

This manual contains important operating and safety information. The user must carefully read and understand the contents of this manual prior to the use of this equipment.

## Warnings

### To avoid electrical shock, always:

1. Use a properly grounded electrical outlet of correct voltage and current handling capacity.
2. Disconnect from the power supply prior to maintenance and servicing.

### To avoid personal injury:

1. Do not use in the presence of flammable or combustible materials — fire or explosion may result. This device contains components which may ignite such materials. Not rated for use in hazardous atmospheres.
2. Use caution when heating volatile materials; top surface and element can reach the “Flash Point Temperature” of many chemicals. These stirring hot plates are not explosion proof. Fire or explosion may result. Unit contains components which may ignite such materials.
3. Keep top surface clean. Use a non-abrasive cleaner. Alkali spills, hydrofluoric acid spills or phosphoric acid spills may damage top and lead to thermal failure. Unplug unit and remove spills promptly. Do not immerse unit for cleaning.
4. Replace the top immediately if damaged by etching, scratching or chipping. A damaged top can break in use.

## SAFETY INFORMATION

5. Do not use metal foil on hot plate which may block air flow. Overheating will result.
6. Check and tighten the removable cord periodically making sure it is secure. If loosened, the cord could become hot and/or spark and be a potential fire hazard. If cord appears damaged, replace immediately. If cord is repeatedly loosened it is recommended to purchase the cord retaining clip (part number AY1313X1 or AY1313X2) listed in the Replacement Parts section of this manual.
7. Do not remove or modify grounded power plug. Use only properly grounded outlets to avoid shock hazard.
8. Use appropriate hand and eye protection when handling hazardous chemicals.
9. Gross weight of items placed on top of stirring hot plates should not exceed 35 lbs. (15.9 kg.) on the 10" x 10" models, 25 lbs. (11.3 kg) on the 7" x 7" models, and 15 lbs. (6.8 kg.) on the 4" x 4" models.
10. "Caution: Hot Top. Avoid Contact." The top plate of the unit can remain hot for some time after use. A "CAUTION - HOT TOP" light will remain on until top plate temperature cools to below 50°C.
11. Note that the exterior housing will be hot during and for a period of time after use.
12. Refer servicing to qualified personnel.

# Specifications

## 4" X 4"

Model Number	SP131015	SP131010-S3 ✓	SP131014
		<b>Overall Dimensions in. (cm)</b>	
Width	5.0" (12.7 cm)	5.0" (12.7 cm)	5.0" (12.7 cm)
Height	3.6" (9.7 cm)	3.6" (9.7 cm)	3.6" (9.7 cm)
Depth	10.0" (25.4 cm)	10.0" (25.4 cm)	10.0" (25.4 cm)
Weight lbs (kg)	7.0 lbs (3.2 kg)	7.0 lbs (3.2 kg)	7.0 lbs (3.2 kg)
		<b>Top Plate</b>	
Width	4.25" (10.8 cm)	4.25" (10.8 cm)	4.25" (10.8 cm)
Height	1.0" (2.5 cm)	1.0" (2.5 cm)	1.0" (2.5 cm)
Depth	4.25" (10.8 cm)	4.25" (10.8 cm)	4.25" (10.8 cm)
		<b>Electrical Ratings</b>	
Volts	120	220-240 ✓	100
Amps	3.3	1.8	4.1
Watts	395	440	410
Freq.	60	50/60	50/60
Phase	1	1	1
Max. Temp. °F (°C)	1004°F (540°C)	1004°F (540°C)	1004°F (540°C)

## 7" X 7"

Model Number	SP131325	SP131320-S3	SP131324
		<b>Overall Dimensions in. (cm)</b>	
Width	8.2" (20.8 cm)	8.2" (20.8 cm)	8.2" (20.8 cm)
Height	3.8" (9.7 cm)	3.8" (9.7 cm)	3.8" (9.7 cm)
Depth	13.0" (33.0 cm)	13.0" (33.0 cm)	13.0" (33.0 cm)
Weight lbs (kg)	11.0 lbs (5.0 kg)	11.0 lbs (5.0 kg)	11.0 lbs (5.0 kg)
		<b>Top Plate</b>	
Width	7.25" (18.4 cm)	7.25" (18.4 cm)	7.25" (18.4 cm)
Height	1.0" (2.5 cm)	1.0" (2.5 cm)	1.0" (2.5 cm)
Depth	7.25" (18.4 cm)	7.25" (18.4 cm)	7.25" (18.4 cm)
		<b>Electrical Ratings</b>	
Volts	120	220-240	100
Amps	8.9	4.9	11.0
Watts	1070	1170	1095
Freq.	60	50/60	50/60
Phase	1	1	1
Max. Temp. °F (°C)	1004°F (540°C)	1004°F (540°C)	1004°F (540°C)

## 10" X 10"

Model Number	SP131635	SP131630-S3	SP131634
		<b>Overall Dimensions in. (cm)</b>	
Width	11.38" (28.9 cm)	11.38" (28.9 cm)	11.38" (28.9 cm)
Height	4.0" (10.2 cm)	4.0" (10.2 cm)	4.0" (10.2 cm)
Depth	16.25" (41.3 cm)	16.25" (41.3 cm)	16.25" (41.3 cm)
Weight lbs (kg)	13.75" (6.24 kg)	13.75" (6.24 kg)	13.75" (6.24 kg)
		<b>Top Plate</b>	
Width	10.5" (26.7 cm)	10.5" (26.7 cm)	10.5" (26.7 cm)
Height	1.0" (2.5 cm)	1.0" (2.5 cm)	1.0" (2.5 cm)
Depth	10.5" (26.7 cm)	10.5" (26.7 cm)	10.5" (26.7 cm)
		<b>Electrical Ratings</b>	
Volts	120	220-240	100
Amps	12	6.5	11.5
Watts	1440	1550	1150
Freq.	60	50/60	50/60
Phase	1	1	1
Max. Temp. °F (°C)	750°F (400°C)	750°F (400°C)	750°F (400°C)

## SPECIFICATIONS

### Heating Specifications

#### Top Plate Surface - Solid Ceramic

##### Temperature range

All 4" x 4" and 7" x 7" models:

41°F to 1004°F (5°C\* - 540°C)

All 10" x 10" models:

41°F to 752°F (5°C - 400°C)

Heat-up time to maximum temperature (unloaded top plate).

8 minutes

Temperature stability at the center of the top plate surface (@ 100°C).

± 2.0°C

Accuracy of the temperature display vs the actual average temperature of a 2" diameter of setting area at the center of the top plate (setpoint 100°C).

± 5.0°C

(Top plate temperature was verified with an infrared camera mounted approx. 26" above the center of the top plate surface; temperature accuracy at the edges of the top plate may vary from the stated accuracy.)

### Stirring Speed Specifications

Speed Range 60 to 1200 RPM

(Maximum speed is dependent on the viscosity of the solution)

Speed Dial Position	Estimated Stirring Speed
2	60 rpm
4	125 rpm
6	350 rpm
8	700 rpm
10	1100 rpm
12	1200 rpm

Stability of the stirring speed setpoint (600 ml of water in a 1000 ml glass flask)

± 5.0%

Top Plate Size	Max Recommended Flask Size	Max Weight on Top Plate
4" x 4"	1 liter	15 lbs
7" x 7"	4 liters	25 lbs
10" x 10"	6 liters	35 lbs

\* This stirring hot plate does not cool. The minimum temperature is 5°C if used in a cold room.

## Environmental Conditions

Operating: 17°C to 27°C; 20% to 80% relative humidity, non-condensing.  
 Installation category II (overvoltage) in accordance with IEC 664. Pollution degree 2 in accordance with IEC 664.  
 Altitude Limit: 2,000 meters.

Storage: -25°C to 65°C  
 10% to 85% relative humidity

## Declaration of Conformity

(for 220-240 volt, -33 CE models only)

Barnstead International hereby declares under its sole responsibility that this product conforms with the technical requirements of the following standards:

EMC:	EN 61000-3-2 EN 61000-3-3 EN 61326-1	Limits for harmonic current emissions Limits for voltage fluctuations and flicker Electrical equipment for measurement, control, and laboratory use; Part I: General Requirements
Safety:	EN 61010-1  EN 61010-2-010  EN 61010-2-051	Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use; Part I: General Requirements Part II: Particular requirements for laboratory equipment for the heating of materials Part II: Particular requirements for laboratory equipment for mixing and stirring

*per the provisions of the Electromagnetic Compatibility Directive 89/336/EEC, as amended by 92/31/EEC and 93/68/EEC, and per the provisions of the Low Voltage Directive 73/23/EEC, as amended by 93/68/EEC.*

The authorized representative located within the European Community is:

Electrothermal Engineering Ltd.  
 419 Sutton Road  
 Southend On Sea  
 Essex SS2 5PH  
 United Kingdom

Copies of the Declaration of Conformity are available upon request.

# Introduction

Please read all the information in this manual before operating the unit.

Your Barnstead|Thermolyne Cimarec stirring hot plate is a general purpose heating and stirring plate designed for laboratory procedures requiring precise control of temperature and/or stirring speed. Each Cimarec stirring hot plate model includes a digital display for monitoring actual temperature. The hot plate is capable of producing accurately controlled top plate temperatures from 5°C through 540°C on all 4" x 4" and 7" x 7" models, and the 5°C through 400°C on 10" x 10" models. The temperature is controlled at the plate surface by an internal sensor.

The stirrer will accurately maintain stirring speeds from 60 rpm up to 1200 rpm. The top plate on the Cimarec units is solid ceramic, and is suitable for use with glass or metal vessels.

Your Cimarec stirring hot plate may be used for general purpose heating applications and/or general laboratory mixing of solutions, including sample preparation, heating reagents, melting paraffin, warming resinous chemicals, content analysis, solvent evaporations, digestions, media preparation and sterilization, titrations, sand baths, and microscale chemistry.

## General Usage

Do not use this product for anything other than its intended usage.



# Principles of Operation

Each Cimarec unit utilizes the latest in microprocessor technology to deliver a reliable, controlled, ceramic top stirring hot plate.

Your Cimarec stirring hot plate has an electronic closed-loop feedback control which will accurately maintain temperature setpoints from 5°C through 400°C or 540°C, depending on the model. Top plate surface temperatures are tested using the latest in infrared temperature measurement. The measurements are made with an infrared camera mounted approximately 26" above the top surface of the stirring hot plate. If the temperature measurement of the ceramic top is made with measurement devices other than infrared, the error of the measuring technique may be greater than the error of the unit.

The electronic stirring speed control will maintain the speed setpoint when the unit is loaded  $\pm 5.0\%$ . The motor in the Cimarec stirring hot plates produces maximum stirring torque under normal laboratory load conditions, and is combined with a powerful magnet to provide exceptional magnetic coupling with a stir bar.

When stirring is turned off, the unique braking feature\* on the Cimarec models immediately brings the fluid and stir bar down to a safe speed for quick flask removal.

\* Patent Pending

---

# Unpacking and Installation

## Unpacking

Remove your Cimarec stirring hot plate from the carton. Inspect to ensure that the unit has not been damaged during shipment. If the unit appears to have sustained shipping damage contact the distributor from whom you purchased this product or Barnstead International Customer Service at 800-553-0039. Check for stir bar and thumbscrew prior to discarding packaging.

*The following items are included in the shipment:*

Cimarec Stirring Hot Plate  
Cord  
Stir Bar  
Adapter (100V models only)  
Knob  
Operator's Manual

If any of these items are missing from the carton, contact Barnstead International.

## Installation

Set the unit on a flat stable surface at least 12" away from combustible materials, and plug the cordset into a properly grounded electrical outlet of correct voltage and current handling capacity.



### **Warning**

Use a properly grounded electrical outlet of correct voltage and current handling capacity.

# Operation

-182-



## Warning

Use caution when heating volatile materials; top surface and element can reach the "Flash Point Temperature" of many chemicals. These hot plates and stirring hot plates are not explosion proof. Fire or explosion may result. Unit contains components which may ignite such materials.

Use appropriate hand and eye protection when handling hazardous chemicals.

"Caution: Hot Top. Avoid Contact." The top plate of the unit can remain hot for some time after use. A "CAUTION - HOT TOP" light will remain on until top plate temperature cools to below 50°C.



## Caution

To avoid damage to the top plate or heating element, always keep a vessel filled with liquid on the top plate of a stirring hot plate when the unit is heating or cooling.

When plugging in the stirring hot plate and powering it up for the first time, you will see the software version and hertz displayed briefly on the digital display.

There is no ON/OFF button on the Cimarec stirring hot plate. Simply turn the HEAT and STIR knobs clockwise to activate.

## Setting the Stirring Speed

Your Cimarec stirring hot plate has an electronic feedback speed control which will maintain a speed set-point from 60 rpm through 1200 rpm at  $\pm 5.0\%$ . (Maximum speed is dependent on viscosity of the solution.) The Cimarec stirring hot plates are equipped with a strong magnet and high torque motor which will draw a vortex in up to 1800 ml of water stirred in a 2 liter flask with a new 2" stir bar (4"x4" models include a 1" stir bar.)

To set the speed, turn the STIR knob to your desired setting. Turn the knob clockwise to increase the speed or counter-clockwise to decrease the speed. To discontinue stirring, turn knob counter-clockwise to OFF.

## Setting the Temperature

Your Cimarec stirring hot plate has an electronic closed-loop feedback control which will accurately maintain temperature setpoints in 5° increments from 5°C through 400°C or 540°C, depending on the model. An unloaded hot plate will heat to maximum temperature in just 8 minutes. The temperature is controlled at the top plate by the internal sensor. A “CAUTION - HOT TOP” light on the front panel will illuminate whenever the top surface temperature exceeds 50°C.

Your Cimarec stirring hot plate will display the temperature in °C. When choosing a setpoint, the display will indicate the setpoint for 5 seconds, after which the display will flash until the desired setpoint is reached.

The display will alternate between “HOT” and “OFF”, and the “CAUTION - HOT TOP” light will flash until the top surface has cooled to below 50°C. Nothing will be displayed on the screen when the unit has been cooled below 50°C and the knob is turned to OFF.



**Note**

The solution temperature is approximately 25% cooler than the hot plate surface temperature.



**Note**

If you allow the top plate to reach the maximum temperature of 540°C while preheating and then turn the control down to a setpoint less than 200°C, the temperature of the top will drop rapidly to 200°C. Because of the natural cooling characteristics of ceramic, the temperature of the top will drop much more gradually after the top plate temperature reaches 200°C.



**Note**

Boiling times are dependent on solution volume and the surface area of the flask that is exposed to the hot plate. For example, when heating the same amount of solution in a 2L flask vs. a 1L flask, the solution will heat about 20% faster.

## To Achieve Fast Heat-up of Large Volumes

If you are heating larger volumes, faster heating can be achieved by turning the heat control knob to maximum temperature until the solution starts to heat, and then turning the setpoint back to your desired top plate temperature. The display will flash the new setpoint until that temperature has been reached.

## Heating Small Volumes

Preheating small volumes is not necessary as it may cause the temperature to overshoot the desired setpoint.

## **Heating Metal Vessels and Sand Baths**

Cimarec is capable of precisely regulating the top plate temperature, metal vessels and sand baths may be heated safely without the danger of the ceramic top breaking. Use the lowest temperature setting possible for applications to limit thermal stress to the ceramic top. Using a metal vessel or sand bath may reduce the life of the stirring hot plate.

# Maintenance

## General Cleaning Instructions

Wipe exterior surfaces with lightly dampened cloth containing mild soap solution.

# Troubleshooting

## Error Codes

The following errors should not be addressed by the user. If any of the errors appear, contact Barnstead International Technical Service at 800-553-0039.

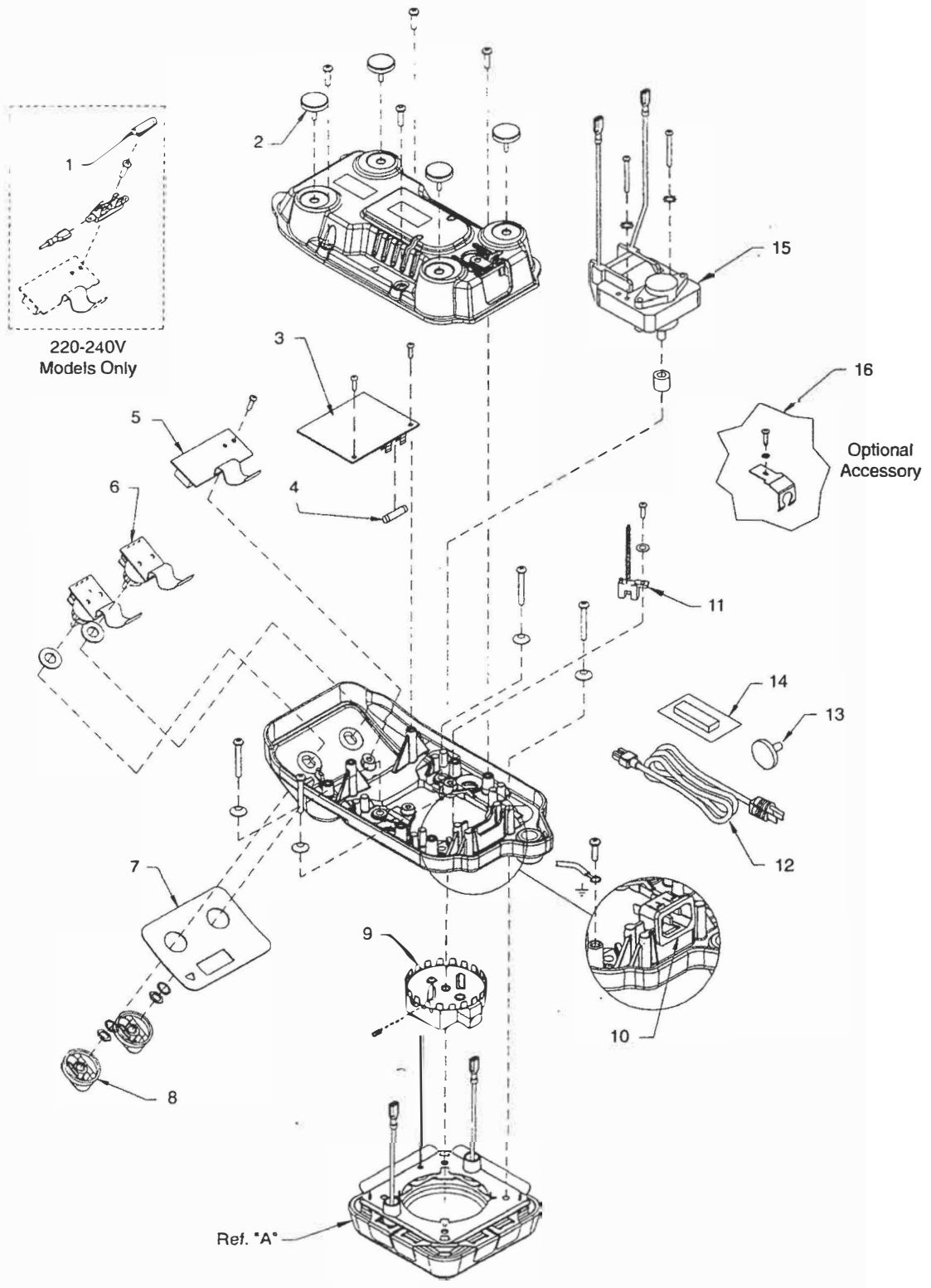
Displayed Message	Intended to Detect	Cause	Solution
E01 <b>Call Tech. Service</b>	Thermocouple out of range.	Thermocouple not connected.  Thermocouple open circuit.	Replace element assembly (attached to thermocouple).
E02 <b>Call Tech. Service</b>	Excessive heat-up time.	Thermocouple short circuit.  Failure of element.  Failure of element circuit.	Remove short.  Replace element assembly (attached to thermocouple).  Replace Element. Replace Control Board.
E11 <b>Call Tech. Service</b>	Alternating current measurement failure.	Failure to detect alternating current.	Replace Control Board.
E12 <b>Call Tech. Service</b>	Motor system failure.	Locked rotor condition.  Failure of motor.  Failure of motor circuit.  Failure of motor sensor.	Free locked rotor.  Replace motor.  Replace Control Board.  Replace motor sensor.

**Notes:**

*Errors E01 and E02 are heating errors. Error Handler will lock out heating functions if heating error is detected. Stirring functionality is unaffected.*

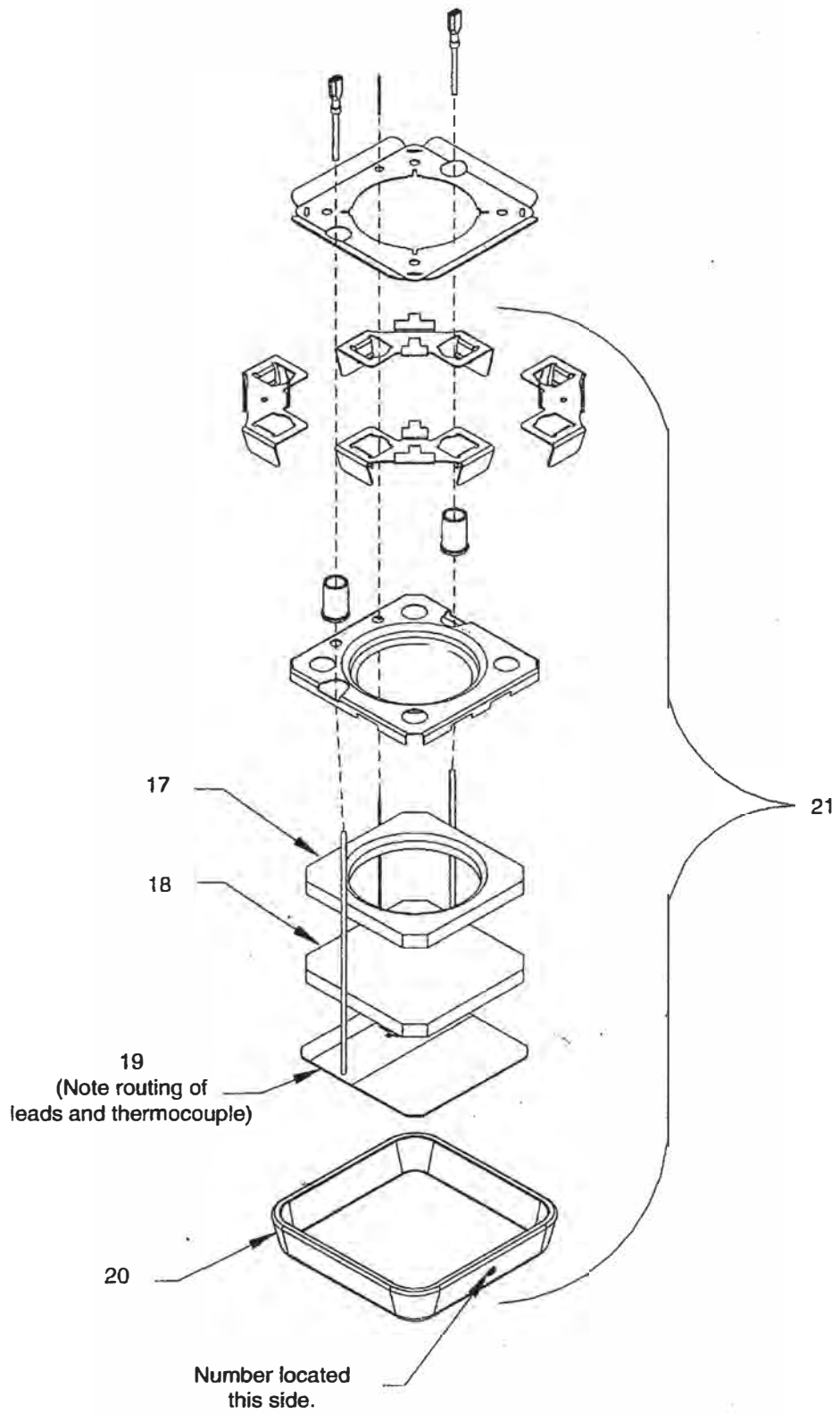
*Errors E11 and E12 are stirring errors. Error Handler will lock out stirring functions if stirring error is detected. Heating functionality is unaffected.*

# Exploded Views



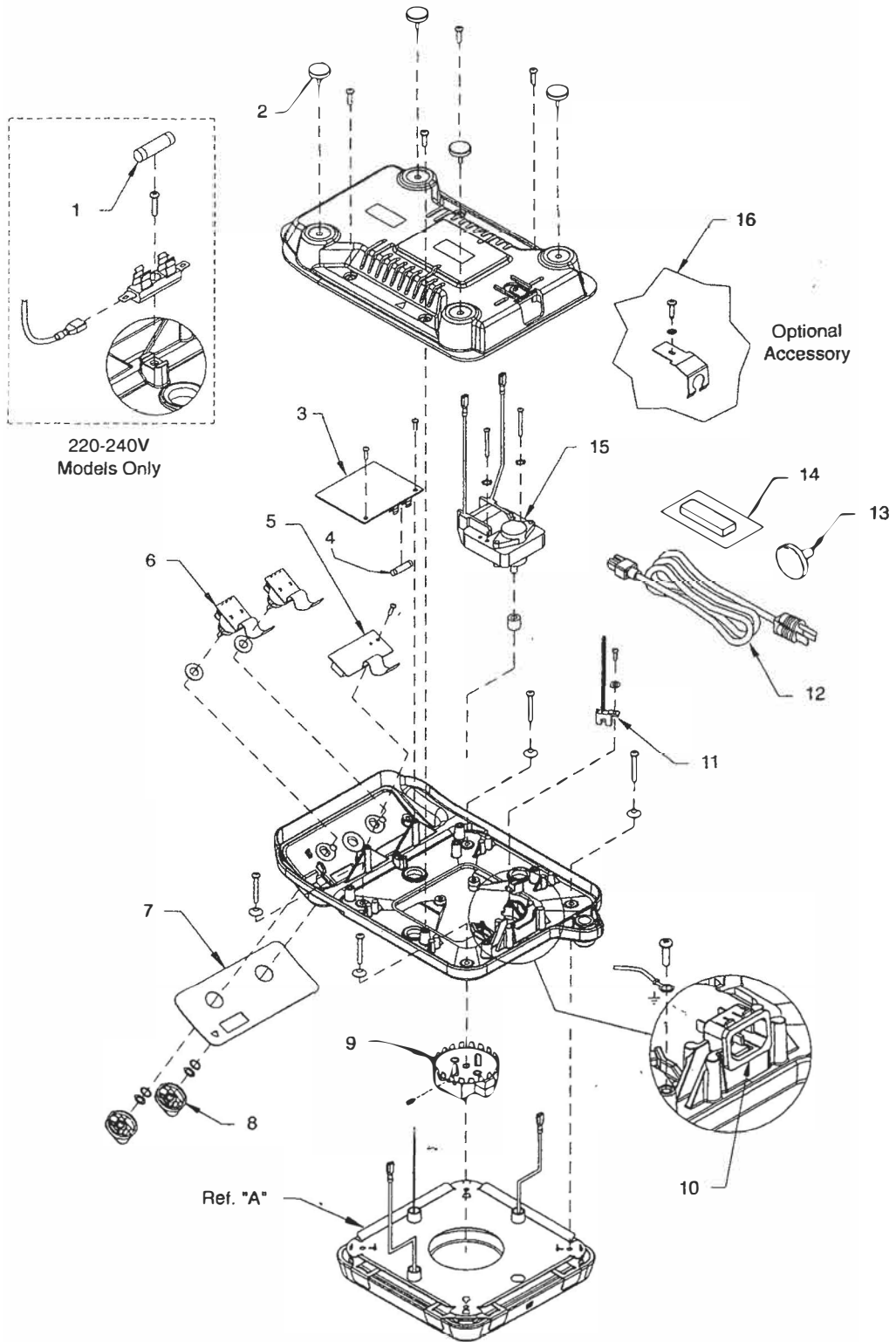
4x4 Exploded View



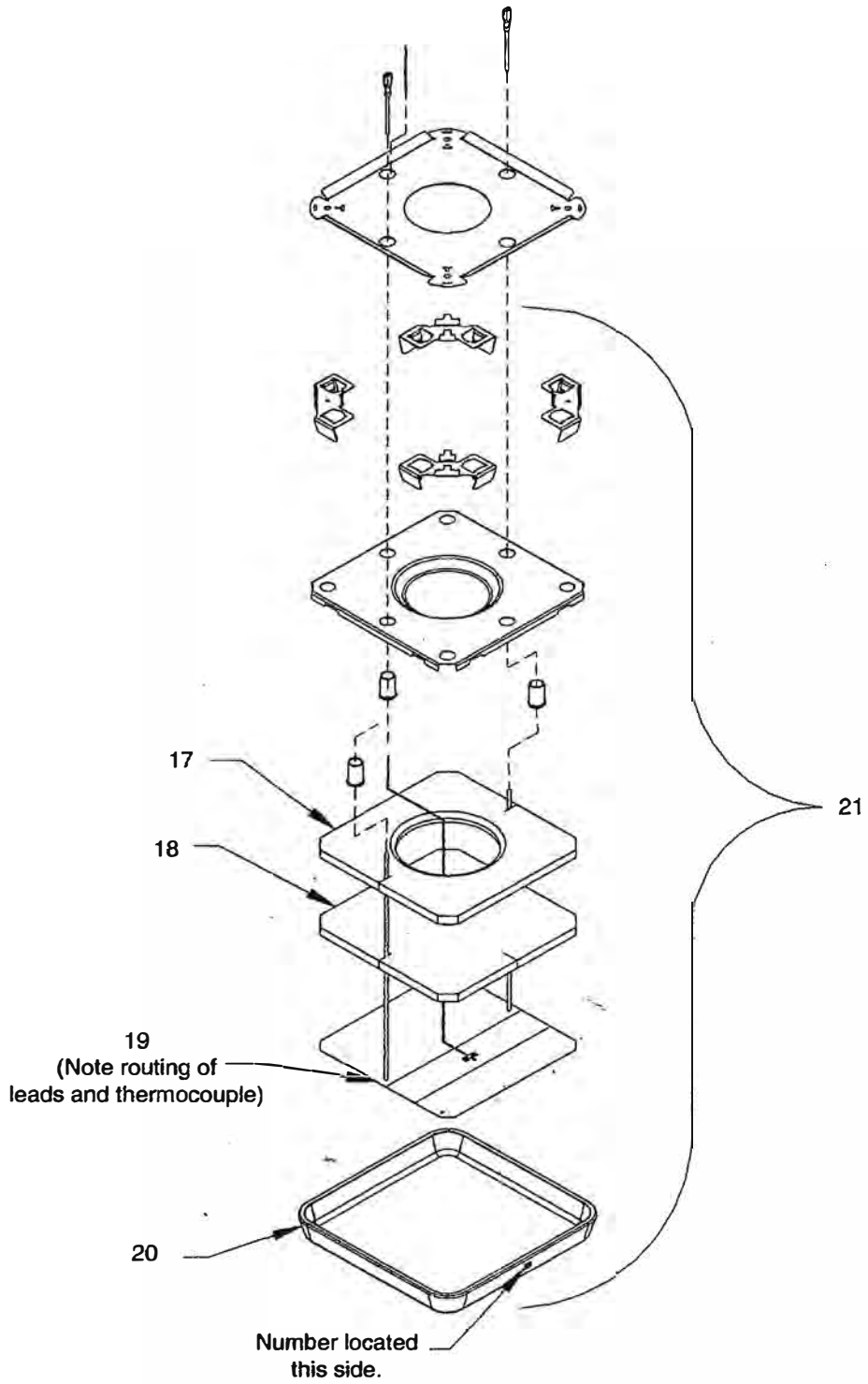


4x4 Exploded View - Top Plate

# EXPLODED VIEWS

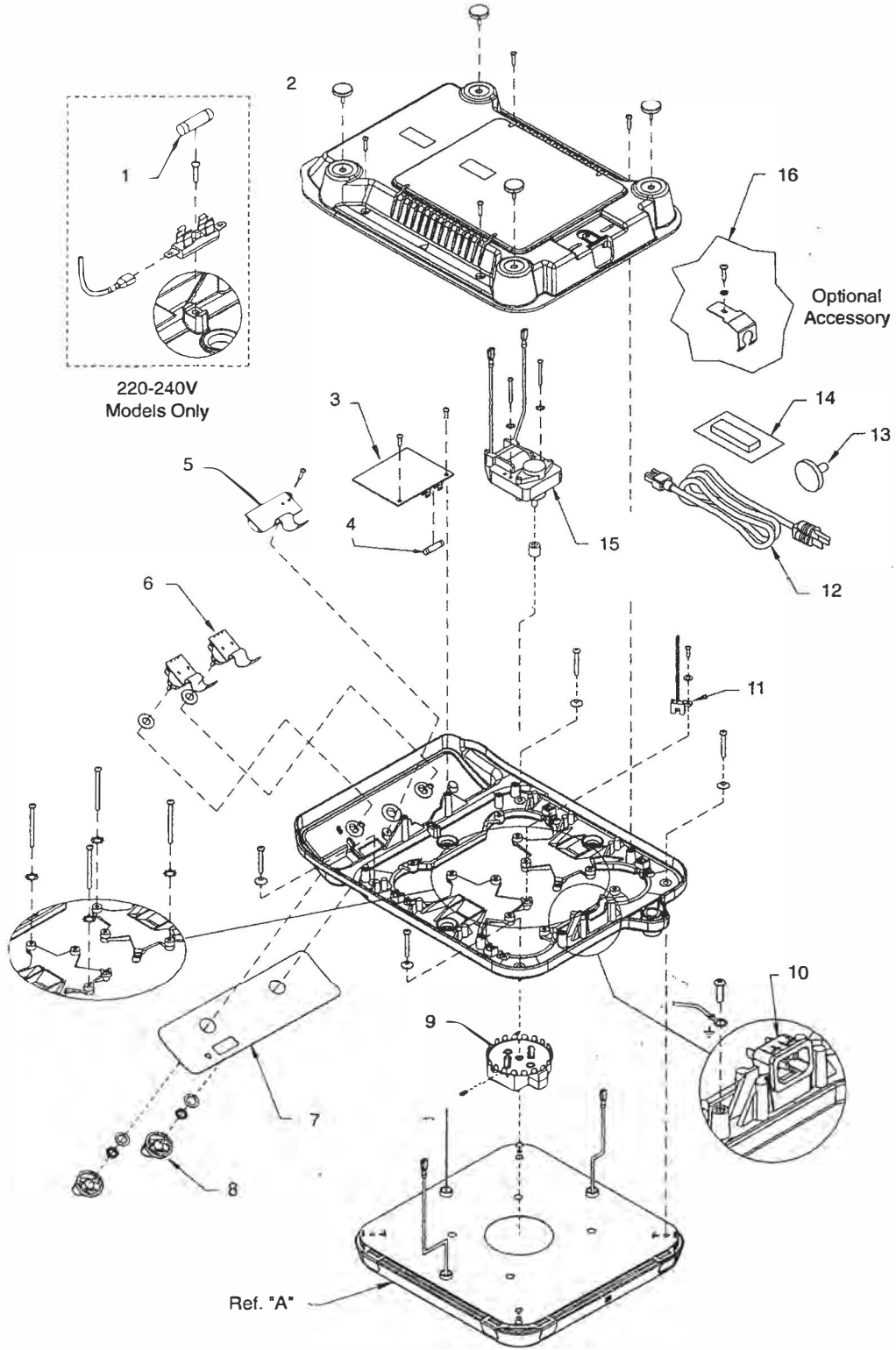


7x7 Exploded View

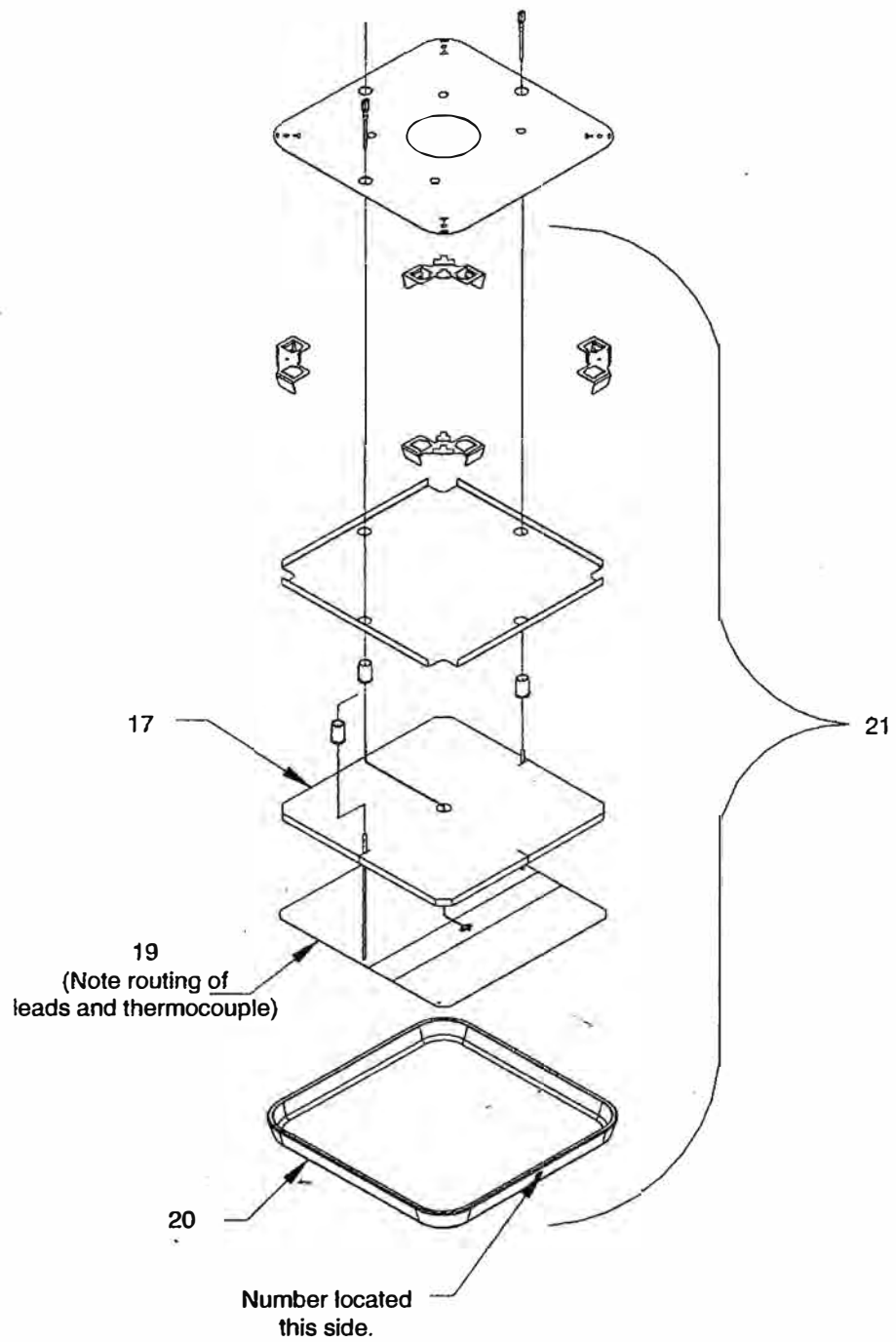


Exploded View - Top Plate

# EXPLODED VIEWS

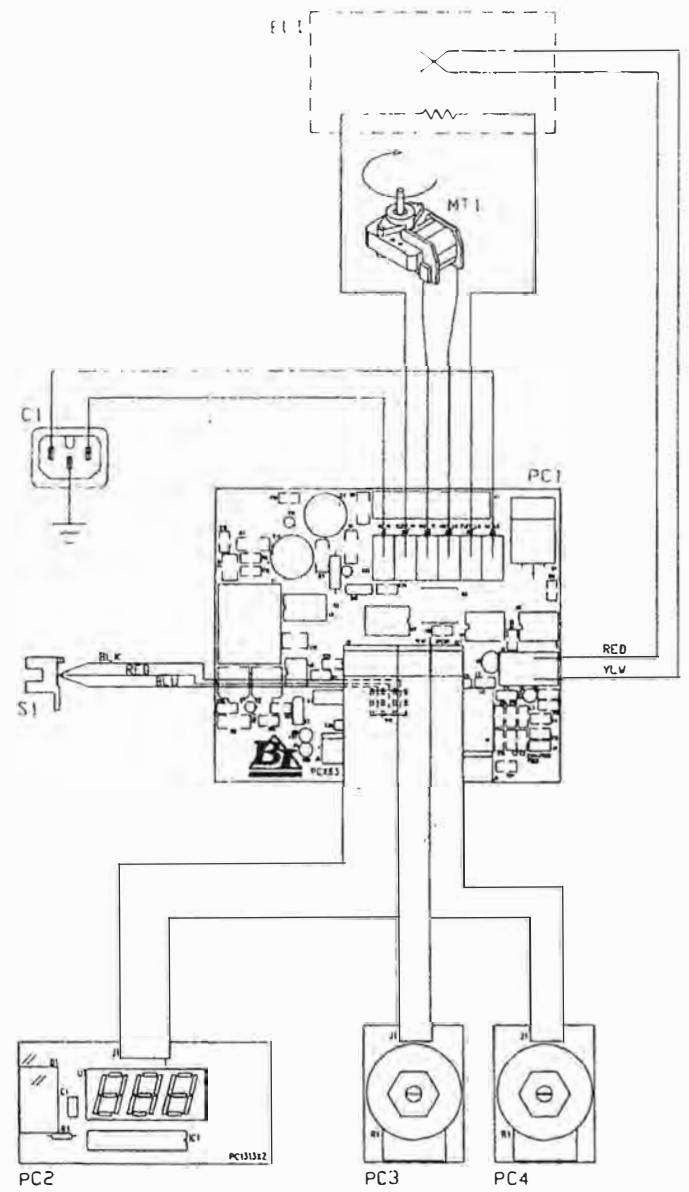


10x10 Exploded View



10 Exploded View - Top Plate

# Wiring Diagram



COMPONENT CHART

	(4x4)	(7x7)	(10x10)
C1	CEX373	CEX373	CEX373
EL1 (100V)	ELX42	ELX45	ELX48
EL1 (120V)	ELX41	ELX44	ELX47
EL1 (220-240V)	ELX43	ELX46	ELX49
MT1 (100-120V)	MT1313X1	MT1313X1	MT1316X1
MT1 (220-240V)	MT1313X2	MT1313X2	MT1316X2
PC1 (100-120V)	PCX83	PCX83	PCX83
PC1 (220-240V)	PCX89	PCX89	PCX89
PC2	PC1313X2	PC1313X2	PC1313X2
PC3	PC1313X1	PC1313X1	PC1313X1
PC4	PC1313X1	PC1313X1	PC1313X1
S1	SC1313X1	SC1313X1	SC1313X1

# Replacement Parts

Key	4x4 Part No.	7x7 Part No.	10x10 Part No.	Description
1	261575	261575	261575	PC Board Fuse - 220-240V
2	FTX34	FTX34	FTX34	Foot (4)
3	PCX83	PCX83	PC1316X1	Control Board - 100V, 120V
3	PCX89	PCX89	PC1316X2	Control Board - 220-240V
4	266058	266058	266058	PC Board Fuse - 100V, 120V
5	PC1313X2	PC1313X2	PC1313X2	Display Board
6	PC1313X1	PC1313X1	PC1313X1	Speed/Heat Adjustment Board (2)
7	DLX276	DLX279	DLX282	Dial Plate
8	KBX103	KBX103	KBX104	Knob (2)
9	MG1310X1	MG1313X1	MG1313X1	Bar Magnet Assembly
10	CEX373	CEX373	CEX373	Power Entry Module
11	SC1310X1	SC1313X1	SC1313X1	Speed Sensor
12	CRX106	CRX106	CRX106	Cord Set - 100 V, 120V
12	CRX107	CRX107	CRX107	Cord Set - 220-240V
13	KBX78	KBX78	KBX78	Knob
14	ZSX122A	ZSX65A	ZSX65A	Stir Bar
15	MT1313X1	MT1313X1	MT1316X1	Motor - 120V, 100V
15	MT1313X2	MT1313X2	MT1316X2	Motor - 220-240V
16	AY1313X1	AY1313X1	AY1313X1	Retaining Clip - 100V, 120V
16	AY1313X2	AY1313X2	AY1313X2	Retaining Clip - 220-240V
17	JNX33	JNX35		Lower Insulation
18	JNX34	JNX36	JNX38	Upper Insulation
19	ELX41	ELX44	ELX47	Heating Element - 120V - w/thermocouple
19	ELX42	ELX45	ELX48	Heating Element - 100V - w/thermocouple
19	ELX43	ELX46	ELX49	Heating Element - 220-240V - w/thermocouple
20	540-0033	710-0117	719-0073	Ceramic Top
21	EL1310X1	EL1313X1	EL1316X1	Hot Plate Top Assembly - 120V
21	EL1310X2	EL1313X2	EL1316X2	Hot Plate Top Assembly - 100V
21	EL1310X3	EL1313X3	EL1316X3	Hot Plate Top Assembly - 220-240V

## Accessories

Part No.	Description
711S	Non-Mercury Thermometer 20 to 100°C Range
647-1S	Non-Mercury Thermometer 0 to 110°C Range
1007-3BLS	Non-Mercury Thermometer -1 to 201°C Range
615-3SC	Mercury Teflon Coated Thermometer -10 to 200°C Range
260CW-3BLS	Teflon Coated, Non-Mercury Thermometer -10°C to 260°C Range
ERT605	Waterproof Digital Thermometer -50 to 280°C
7077	Thermometer Clamp
7068	90° Clamp Holder
1000-2	12" Aluminum Rod
7078	Large Clamp
7079	Small Clamp (up to 1/2")

---

# Ordering Procedures

Please refer to the Specification Plate for the complete model number, serial number, and series number when requesting service, replacement parts or in any correspondence concerning this unit.

All parts listed herein may be ordered from the Bamstead International dealer from whom you purchased this unit or can be obtained promptly from the factory. When service or replacement parts are needed we ask that you check first with your dealer. If the dealer cannot handle your request, then contact our Customer Service Department at 563-556-2241 or 800-553-0039.

Prior to returning any materials to Bamstead International, please contact our Customer Service Department for a "Return Materials Authorization" number (RMA). Material returned without an RMA number will be refused.



# Two Year “Bumper to Bumper” Warranty

Barnstead International (“BARNSTEAD”) warrants that a product manufactured by Barnstead shall be free of defects in materials and workmanship for two (2) years from the first to occur of (i) the date the product is sold by BARNSTEAD or (ii) the date the product is purchased by the original retail customer (the “Commencement Date”). Except as expressly stated above, BARNSTEAD MAKES NO OTHER WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, WITH RESPECT TO THE PRODUCTS AND EXPRESSLY DISCLAIMS ANY AND ALL WARRANTIES, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF DESIGN, MERCHANT ABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

An authorized representative of BARNSTEAD must perform all warranty inspections. In the event of a defect covered by BARNSTEAD’s warranty, BARNSTEAD shall, as its sole obligation and exclusive remedy, provide free replacement parts to remedy the defective product. In addition, for products sold by BARNSTEAD within the continental United States or Canada, BARNSTEAD shall provide provide free labor to repair the products with the replacement parts, but only for a period of ninety (90) days from the Commencement Date.

BARNSTEAD’s warranty provided hereunder shall be null and void and without further force or effect if there is any (i) repair made to the product by a party other than BARNSTEAD or its duly authorized service representative, (ii) misuse (including use inconsistent with written operating instructions for the product), mishandling, contamination, overheating, modification or alteration of the product by any customer or third party or (iii) use of replacement parts that are obtained from a party who is not an authorized dealer of BARNSTEAD.

Heating elements, because of their susceptibility to overheating and contamination, must be returned to the BARNSTEAD factory and if, upon inspection, it is concluded that failure is due to factors other than excessive high temperature or contamination, BARNSTEAD will provide warranty replacement. As a condition to the return of any product, or any constituent part thereof, to BARNSTEAD’s factory, it shall be sent prepaid and a prior written authorization from BARNSTEAD assigning a Return Materials Number to the product or part shall be obtained.

IN NO EVENT SHALL BARNSTEAD BE LIABLE TO ANY PARTY FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL, INCIDENTAL, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES, OR FOR ANY DAMAGES RESULTING FROM LOSS OF USE OR PROFITS, ANTICIPATED OR OTHERWISE; ARISING OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SALE, USE OR PERFORMANCE OF ANY PRODUCTS, WHETHER SUCH CLAIM IS BASED ON CONTRACT, TORT (INCLUDING NEGLIGENCE), ANY THEORY OF STRICT LIABILITY OR REGULATORY ACTION.

The name of the authorized Barnstead International dealer nearest you may be obtained by calling 1-800-446-6060 (563-556-2241) or writing to:



**Barnstead International**

*Your Lab Starts Here*

2555 Kerper Boulevard  
Dubuque, Iowa 52001-9918  
Phone: 563-556-2241 or 800-553-0039  
Fax: 563-589-0516  
E-mail: [mkt@barnstead.com](mailto:mkt@barnstead.com)  
[www.barnstead.com](http://www.barnstead.com)



**ANEXO N° 02**  
**ANÁLISIS DE PRODUCTOS**

**ANEXO A2.1**  
**ESPECTROS IR DE LOS PRODUCTOS**

FIGURA A2.1  
ESPECTRO INFRA ROJO

Muestra Prueba Cero

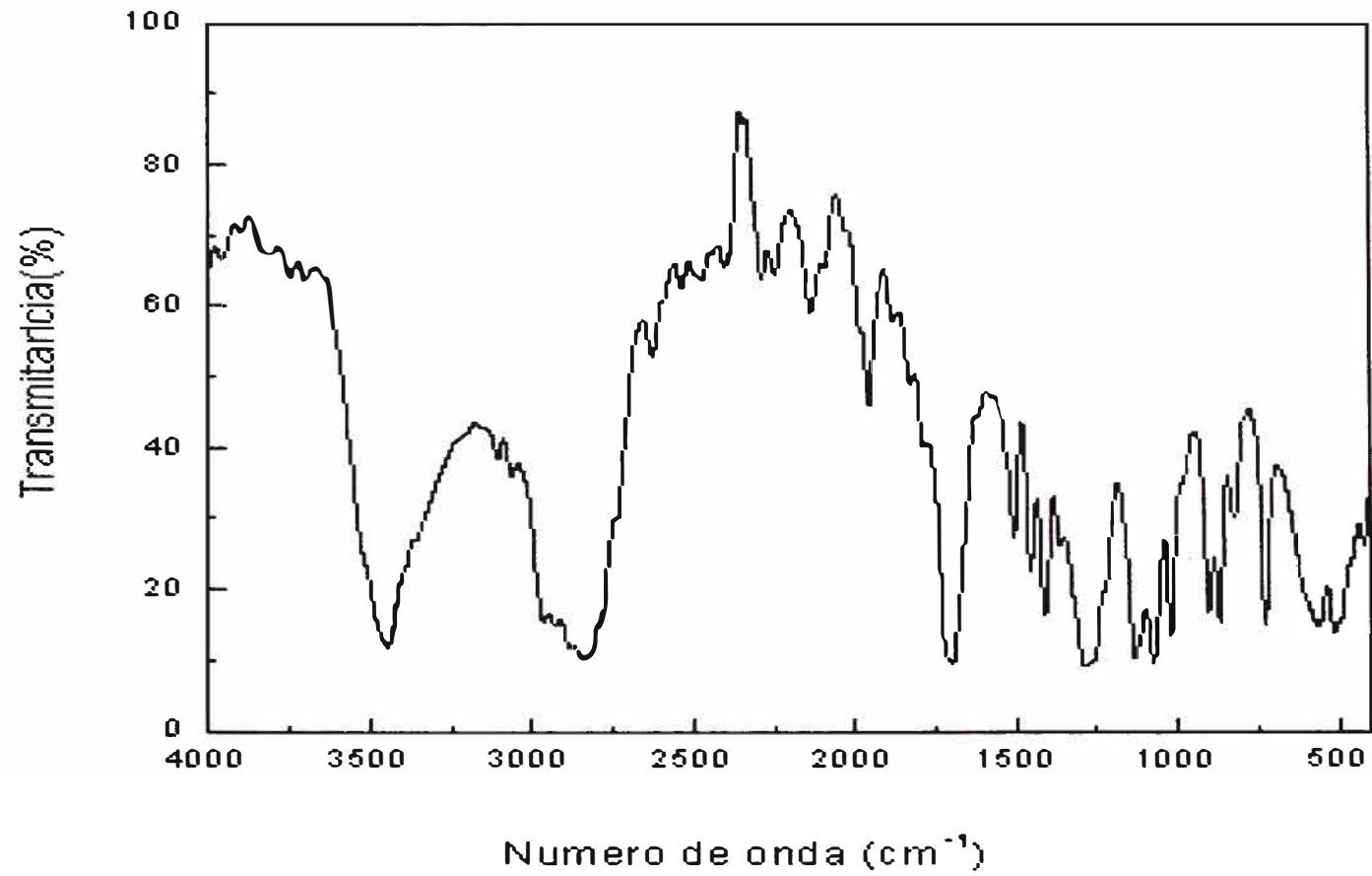


FIGURA A2.2  
ESPECTRO INFRA ROJO

Muestra Compósito Pruebas 1-5

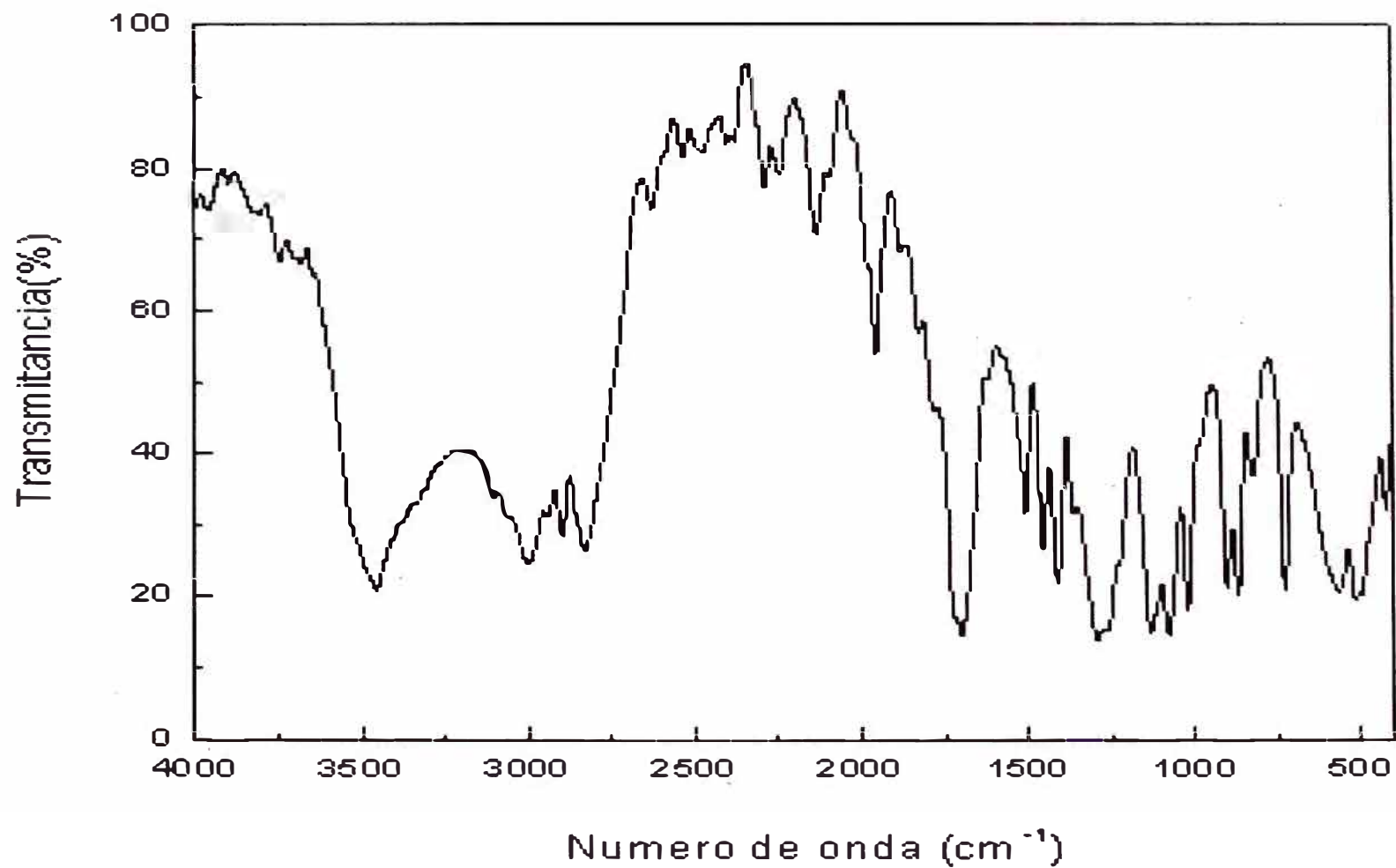


FIGURA A2.3  
ESPECTRO INFRA ROJO

Muestra Compósito Pruebas 6-10

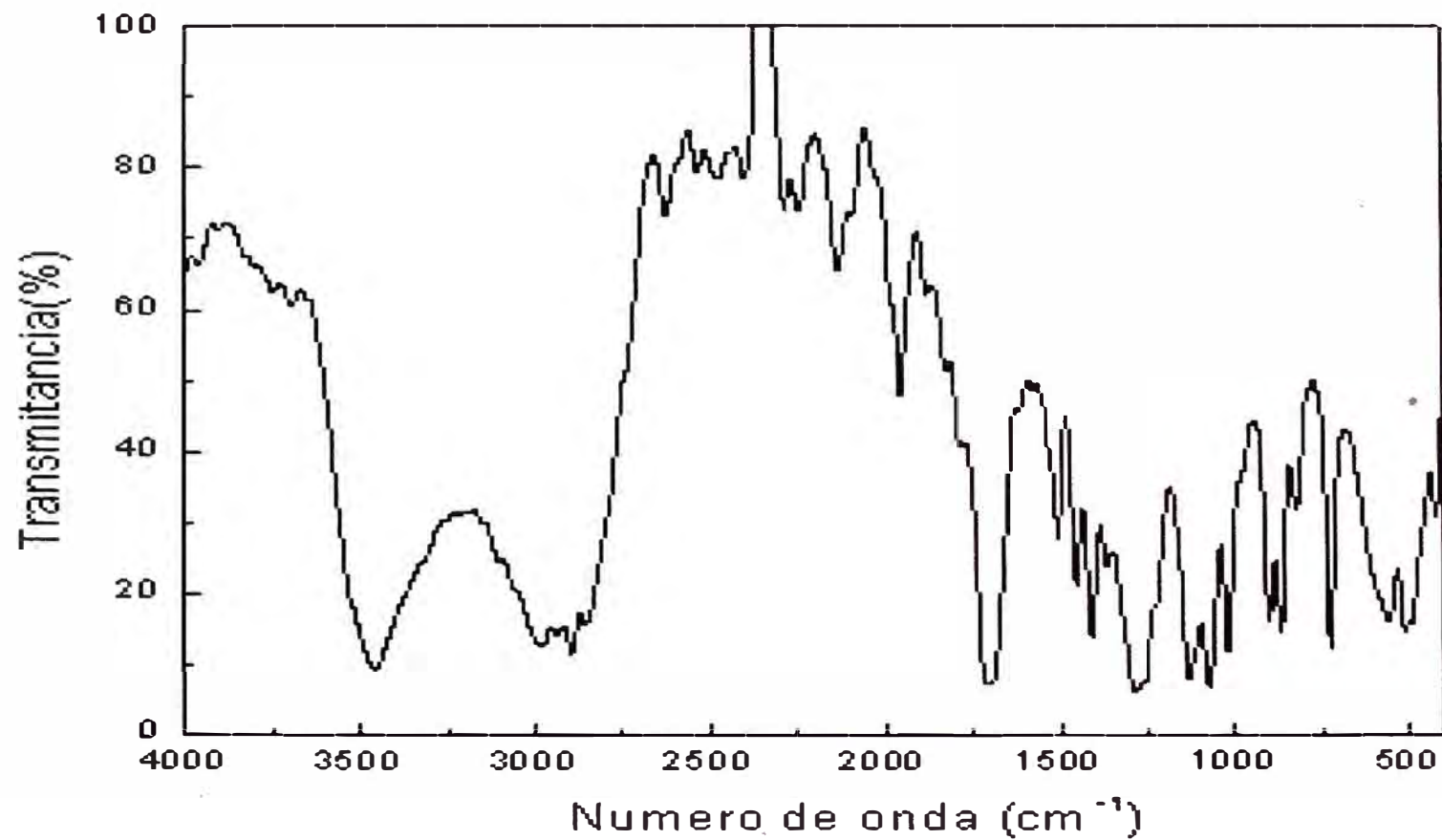
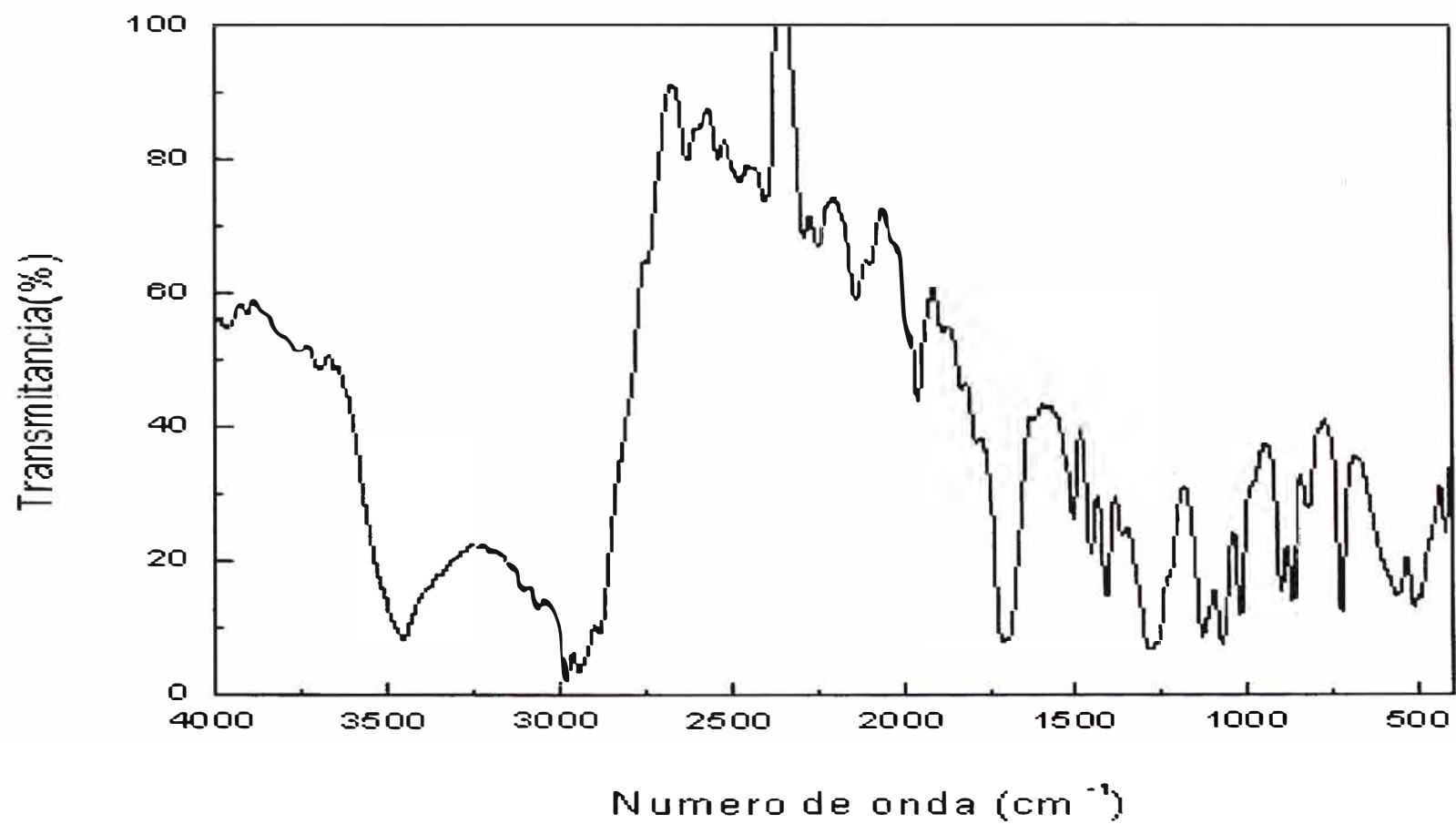


FIGURA A2.4  
ESPECTRO INFRA ROJO

Muestra Prueba Confirmación



**ANEXO A2.2**

**RESULTADOS DE PUNTOS DE FUSIÓN DE MATERIA PRIMA Y PRODUCTOS**





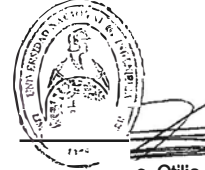
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
LABORATORIO N° 12  
ANÁLISIS QUIMICO, CONSULTORIA E INVESTIGACION

**INFORME TÉCNICO N° 0087 – 10 – LAB. 12**

1. **DATOS DEL SOLICITANTE**
- 1.1 NOMBRE DEL SOLICITANTE SR. JOSE LUIS LAMA MANAYAY
2. **FECHA DE EMISION** 29/01/2010
3. **ANÁLISIS SOLICITADO** DETERMINACION DE PUNTO DE FUSION EN PET
4. **DATOS REFERENCIALES DE LA MUESTRA**
- 4.1 IDENTIFICACION DE LAS MUESTRAS 04 MUESTRAS DE PET, IDENTIFICADAS POR EL SOLICITANTE COMO M-A, M-B, M-C Y M-D
5. **LUGAR DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA:** LABORATORIO N°12 - FACULTAD DE CIENCIAS
6. **CONDICIONES AMBIENTALES** Temperatura: 22 °C; Humedad relativa: 60 %
7. **RESULTADOS**

MUESTRA	PUNTO DE FUSION (°C)
M-A	106
M-B	107
M-C	106
M-D	253

8. **VALIDEZ DEL INFORME TECNICO**  
El Informe técnico es válido solo para la muestra y las condiciones indicadas en los ítems del uno (01) al cuatro (04) del presente informe técnico.



c. Otilia Acha de la Cruz  
Responsable del análisis  
Firmado por: Ing. Sebastián Lazo Ochoa  
CIP N° 74236

El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.

**ANEXO N° 03**  
**DATOS Y TABLAS**

**ANEXO A3.1**  
**GENERACIÓN DE RSU POR DISTRITO EN LIMA, 2000-2008**

## FIGURA A3.1 GENERACIÓN DE RSU EN LIMA POR DISTRITO

Resumen Sólidos

Anuario de Estadísticas Ambientales 2009

### A. RESIDUOS SÓLIDOS

#### 5.1 RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS EN LOS DISTRITOS DE LA PROVINCIA DE LIMA, 2000-2008 (Toneladas)

Distrito	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008 P/
<b>Total</b>	<b>1 411 612</b>	<b>1 495 521</b>	<b>1 547 025</b>	<b>2 156 793</b>	<b>2 154 308</b>	<b>1 951 150</b>	<b>2 086 345</b>	<b>2 164 669</b>	<b>2 504 234</b>
Ancón	5 439	6 802	6 168	9 525	9 777	12 637	13 666	13 917	11 401
Ate	91 277	78 368	80 053	111 132	113 388	111 819	118 996	127 369	161 453
Barranco	9 180	10 282	10 476	11 987	12 250	14 165	14 413	20 354	14 258
Breña	19 955	21 309	21 628	24 659	25 117	20 149	20 517	26 293	32 295
Carabaylo	20 415	19 947	27 126	35 874	36 465	41 339	44 385	35 492	40 063
Chaclacayo	5 724	5 526	5 619	6 862	6 983	6 518	6 753	7 004	6 638
Chomillos	41 168	42 407	43 129	60 074	60 985	57 509	60 004	55 373	60 345
Cieneguilla	1 701	1 763	1 839	2 045	2 662	2 880	3 091	2 977	4 717
Comas	86 853	93 231	94 160	155 030	146 852	123 608	132 224	150 637	148 115
El Agustino	22 254	22 538	22 745	42 851	43 245	42 266	43 702	44 404	129 283
Independencia	31 169	32 686	33 030	64 795	61 556	48 263	55 844	59 417	52 240
Jesús María	16 067	18 757	19 128	25 116	21 878	24 165	24 643	24 596	26 586
La Molina	44 458	48 971	50 125	46 012	46 879	49 066	53 228	52 071	56 221
La Victoria	84 417	94 761	96 265	127 479	130 069	100 673	102 153	109 280	102 761
Lima	142 469	149 363	150 241	152 626	153 805	166 102	177 859	177 573	177 685
Lince	15 277	19 043	19 427	15 900	16 272	17 123	24 112	25 039	19 831
Los Olivos	61 186	67 628	76 963	89 305	84 976	76 351	79 887	82 938	93 179
Lungancho	16 419	16 778	17 121	13 967	23 727	16 545	27 665	25 104	31 797
Lurín	10 161	9 214	12 631	20 365	20 876	17 360	18 525	15 336	18 434
Magdalena del Mar	10 266	11 783	12 085	23 888	24 601	18 566	19 080	17 665	17 156
Miraflores	34 242	36 373	37 265	40 075	41 957	41 460	43 297	42 763	44 718
Pachacámac	6 112	5 336	5 485	3 743	3 827	11 993	13 314	8 227	15 934
Pucusana	581	4 446	620	506	516	1 179	1 286	635	1 717
Pueblo Libre	14 664	18 041	18 338	25 409	25 897	25 191	27 028	27 199	27 570
Puente Piedra	22 881	20 798	21 471	75 797	77 952	51 987	56 280	50 894	49 998
Punta Hermosa	779	680	1 125	1 937	1 999	1 878	1 983	1 815	1 783
Punta Negra	638	556	576	475	735	734	793	537	476
Rimac	46 189	51 534	52 152	62 594	59 428	48 124	49 204	55 804	66 812
San Bartolo	490	475	483	393	400	1 046	1 122	419	1 528
San Borja	32 607	37 394	44 270	31 094	29 234	31 132	39 008	36 548	35 905
San Isidro	25 660	29 123	29 976	32 267	32 018	33 713	42 970	45 242	49 049
San Juan de Lurigancho	100 157	101 902	103 415	195 692	198 302	175 006	184 538	191 831	327 241
San Juan de Miraflores	51 687	57 238	58 626	96 014	91 211	79 535	82 843	89 966	80 341
San Luis	10 667	14 217	14 589	22 218	22 838	16 884	22 307	22 124	21 130
San Martín de Porres	79 708	92 161	94 267	154 232	157 654	122 501	121 191	167 921	152 336
San Miguel	29 981	29 882	30 227	39 158	39 630	33 736	34 857	35 863	37 086
Santa Anita	19 834	20 609	22 536	51 946	53 188	45 774	48 167	55 067	66 549
Santa María del Mar	55	144	154	361	437	432	378	419	466
Santa Rosa	794	911	1 076	1 740	1 786	1 452	1 507	1 474	1 351
Santiago de Surco	81 399	87 487	93 046	98 663	93 199	94 555	99 526	99 435	126 141
Surquillo	22 436	26 751	27 141	29 429	31 794	27 045	27 711	31 254	27 491
Villa El Salvador	48 598	44 187	45 188	80 048	75 479	73 763	77 986	60 243	83 149
Villa María del Triunfo	45 598	44 119	45 040	73 510	72 454	64 926	68 302	66 150	81 005

Nota: Para el año 2008 los residuos sólidos fueron estimados según Ordenanza Municipal para el cobro de los arbotinos a excepción de los distritos de Ate, Chaclacayo, Lince, Lungancho, Lurín, Magdalena del Mar, Miraflores, Pueblo Libre, Punta Hermosa, San Isidro y San Miguel cuya estimación fue realizada por la subgerencia de medio Ambiente. Los residuos sólidos comprenden básicamente los residuos domiciliarios, comerciales y los recogidos por el servicio de limpieza pública. No incluye desmontes

Fuente: Sistema Nacional de Información Ambiental. (2009). "Residuos sólidos generados en los distritos de la provincia de Lima, 2000-2008". Disponible en:  
<http://sinia.minam.gob.pe/index.php?accion=verListTipoEstadistica&idGrupo=3>

**ANEXO A3.2**  
**GENERACIÓN PER CÁPITA DE RSU POR DISTRITO EN LIMA, 2007**

## FIGURA A3.2 GENERACIÓN POERCÁPITA DE RSU EN LIMA POR DISTRITO

Residuos Sólidos

Anuario de Estadísticas Ambientales 2009

### 5.3 RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS, SEGÚN DISTRITO DE LA PROVINCIA DE LIMA, 2007

Distrito	Generación per cápita (Kg/hab/día) <sup>a/</sup>	Generación por día (Tonelada / día)	Generación anual (Tonelada / año)
<b>Total</b>	<b>0,82</b>	<b>5 930,83</b>	<b>2 164 669</b>
Ancón	1,20	38,13	13 917
Ate	0,90	348,96	127 369
Barranco	1,10	55,77	20 354
Breña	0,70	72,04	26 293
Carabaylo	0,60	97,24	35 492
Chacladayo	0,43	19,19	7 004
Chorrillos	0,52	151,71	55 373
Cieneguilla	0,50	8,15	2 977
Comas	0,80	412,70	150 637
El Agustino	0,70	121,65	44 404
Independencia	0,75	162,79	59 417
Jesús María	0,90	67,39	24 596
La Molina	0,94	142,66	52 071
La Victoria	1,20	299,40	109 280
Lima Cercado	1,36	486,50	177 573
Lince	0,87	68,60	25 039
Los Olivos	0,70	227,23	82 938
Lurigancho	0,50	68,78	25 104
Lurín	0,75	42,02	15 336
Magdalena del Mar	0,80	48,40	17 665
Pueblo Libre	0,85	74,52	27 199
Miraflores	1,11	117,16	42 763
Pachacámac	0,60	22,54	8 227
Pucusana	0,35	1,74	635
Puente Piedra	0,72	139,44	50 894
Punta Hermosa	0,83	4,97	1 815
Punta Negra	0,30	1,47	537
Rímac	0,68	152,89	55 804
San Bartolo	0,30	1,15	419
San Borja	0,71	100,13	36 548
San Isidro	1,56	123,95	45 242
San Juan de Lurigancho	0,65	525,56	191 831
San Juan de Miraflores	0,60	246,48	89 966
San Luis	0,90	60,61	22 124
San Martín de Porres	0,90	460,06	167 921
San Miguel	0,70	98,25	35 863
Santa Anita	0,87	150,87	55 067
Santa María del Mar	3,20	1,15	419
Santa Rosa	0,40	4,04	1 474
Santiago de Surco	0,97	272,67	99 435
Surquillo	0,80	85,63	31 254
Villa El Salvador	0,45	165,05	60 243
Villa María del Triunfo	0,50	181,23	66 150

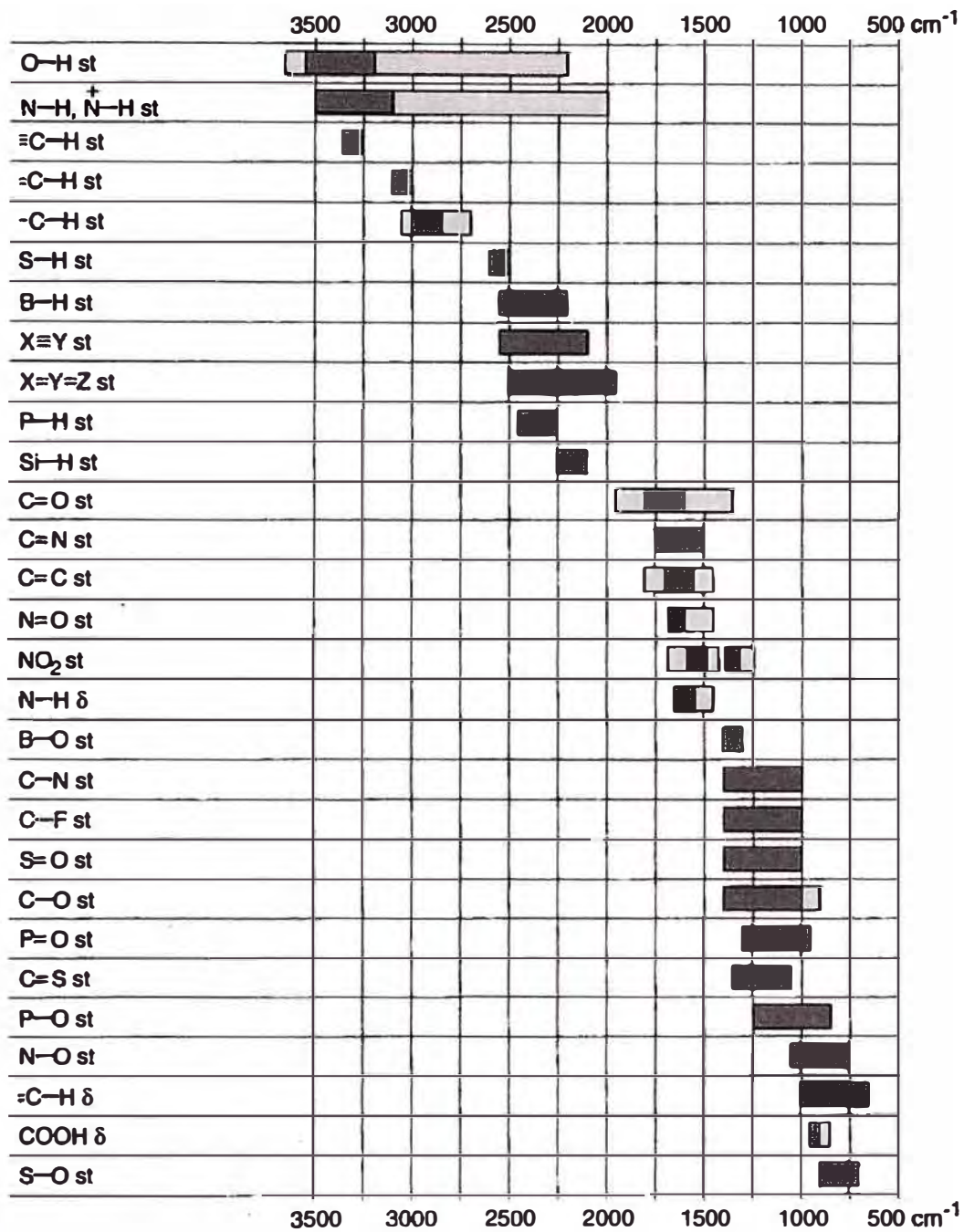
<sup>a/</sup> Estimación de la generación distrital de residuos de responsabilidad municipal domiciliar, comercial y de limpieza pública

Fuente: Sistema Nacional de Información Ambiental. (2009). "Residuos sólidos generados según distrito de la provincia de Lima, 2007". Disponible en:

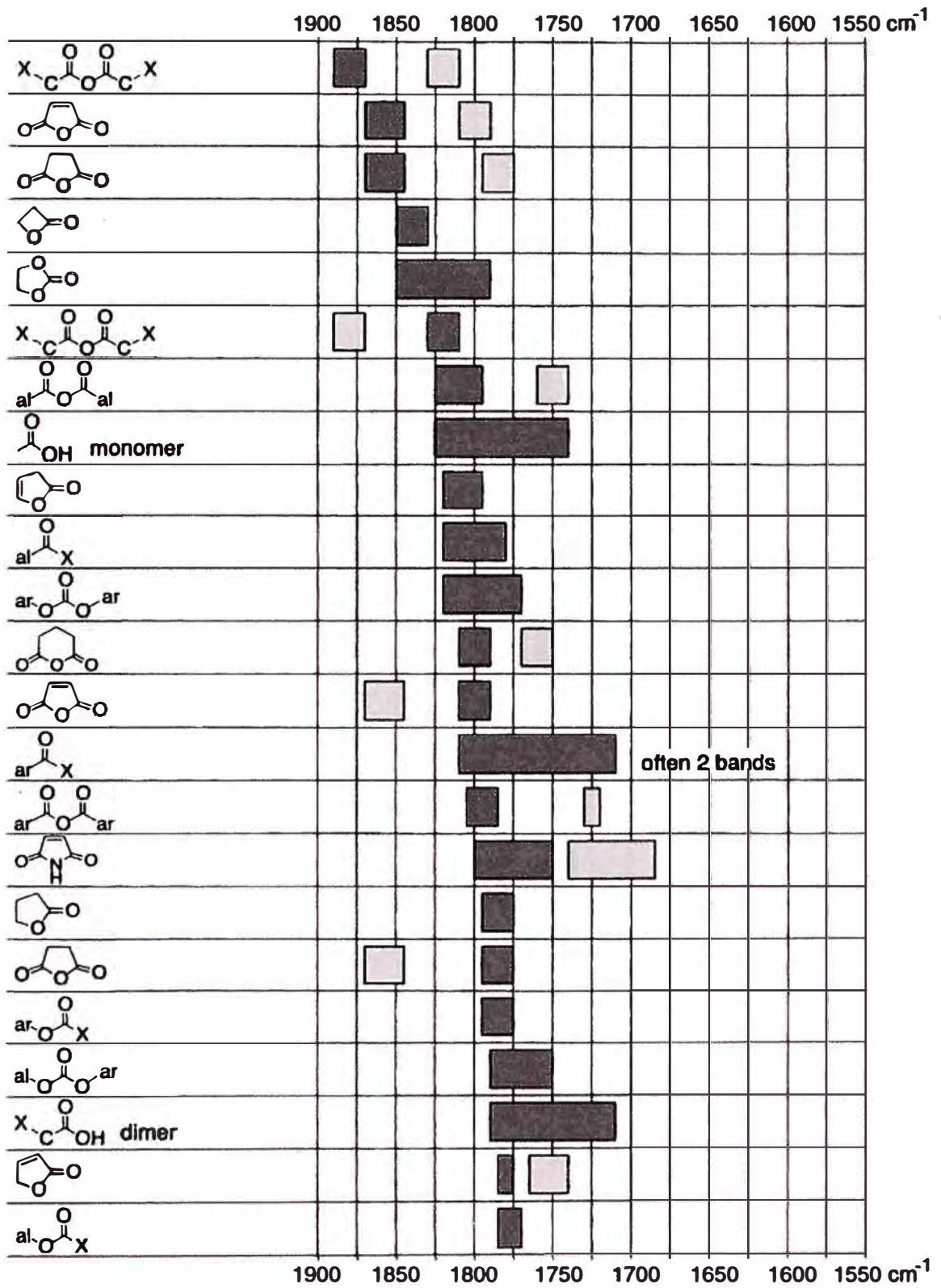
<http://sinia.minam.gob.pe/index.php?accion=verListTipoEstadistica&idGrupo=3>

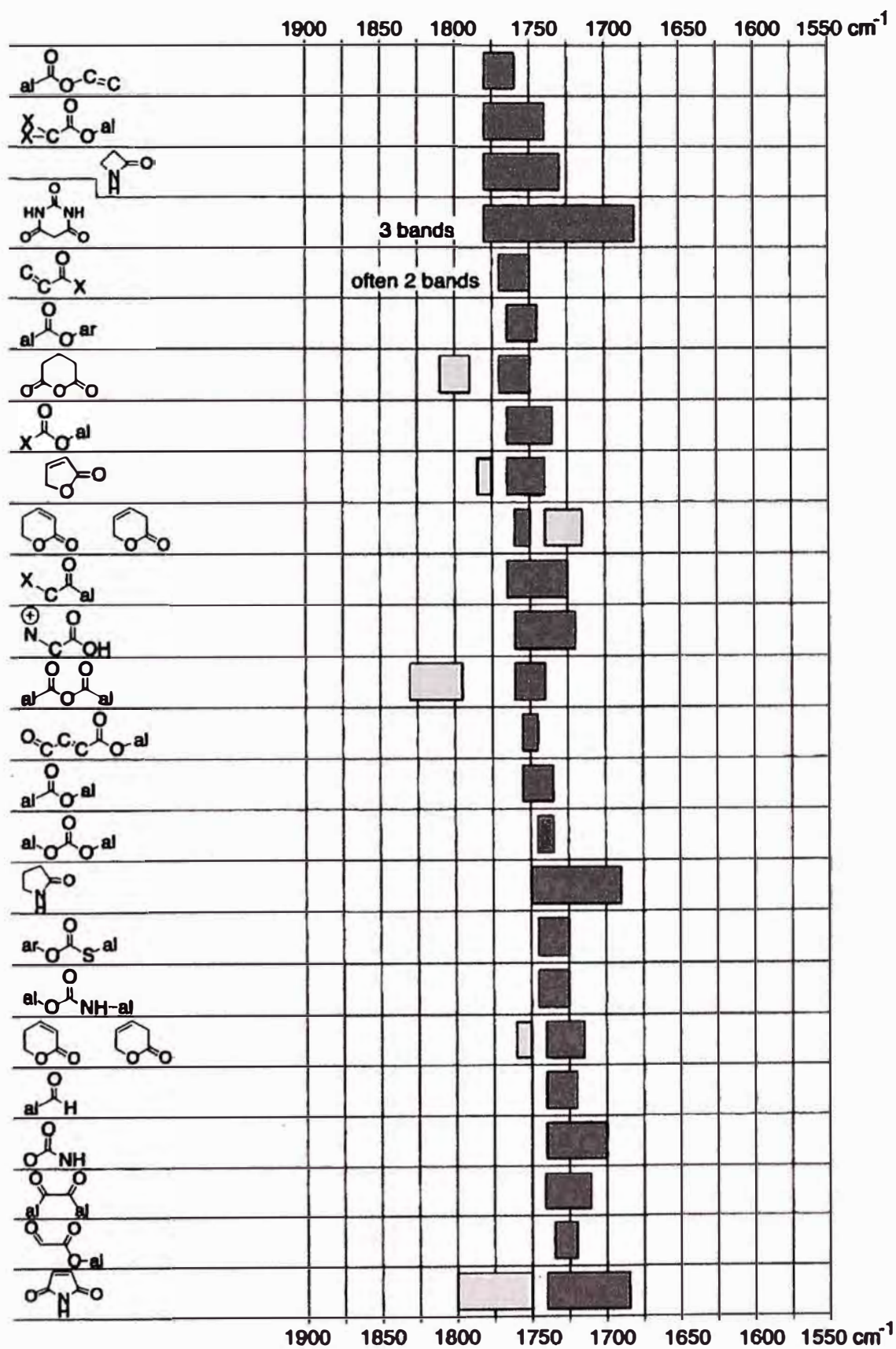
**ANEXO A3.3**  
**RESUMEN DE LAS BANDAS MÁS IMPORTANTES DE ABSORCIÓN IR**

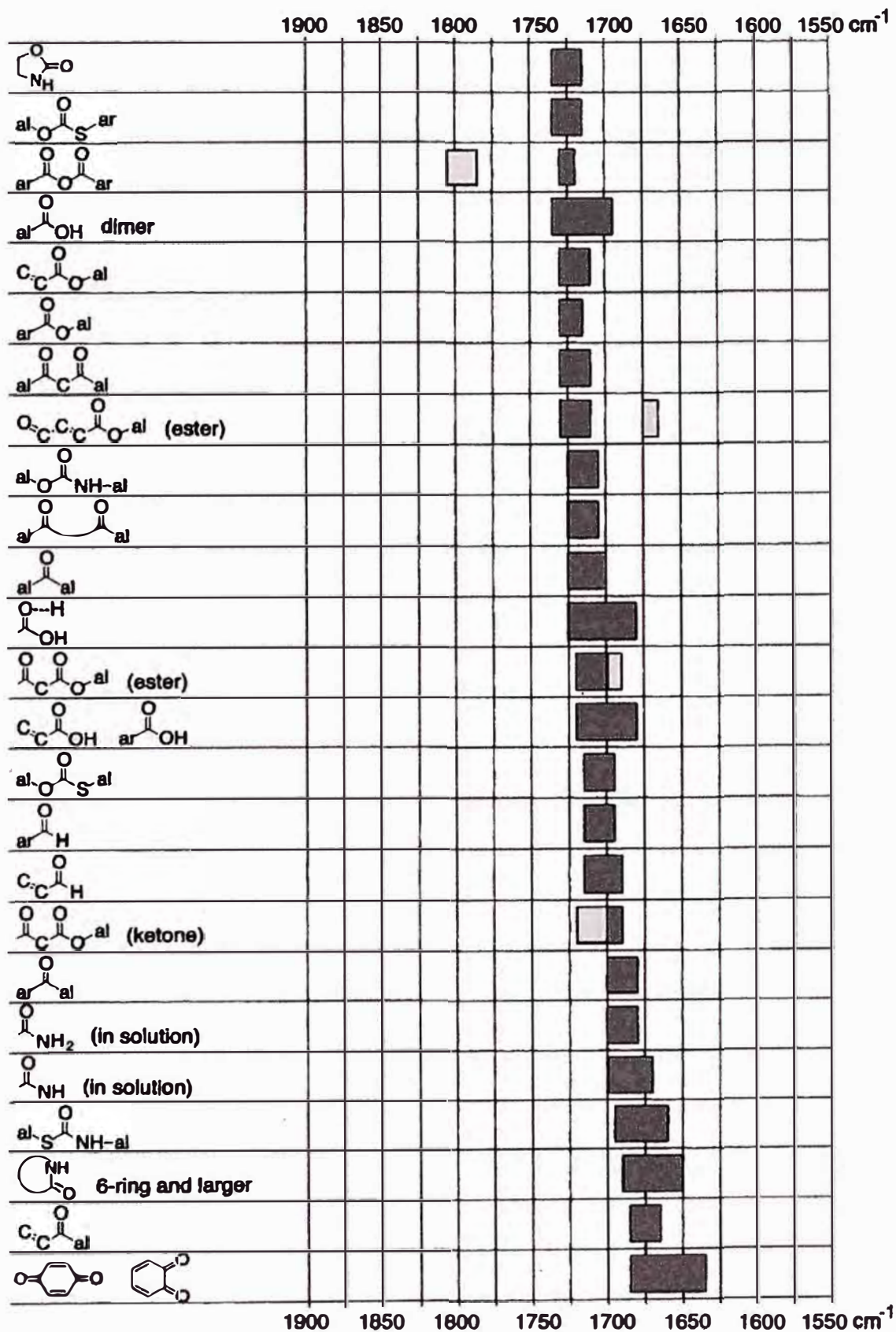
**FIGURA A3.3**  
**RESUMEN DE BANDAS MÁS IMPORTANTES DE ABSORCIÓN IR**

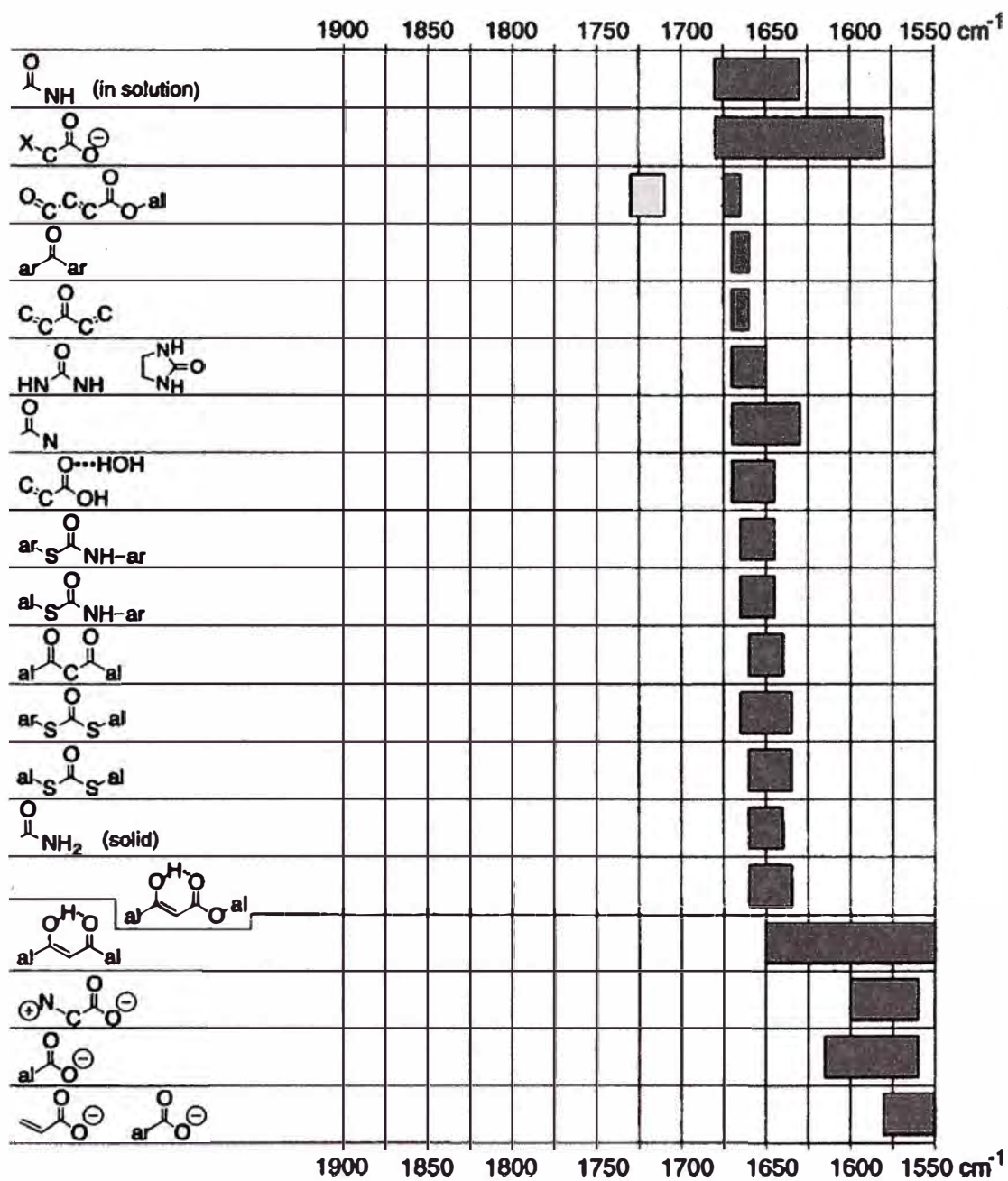












Fuente: PRETSCH Ernoe, et. al. (2000). "Determinación de la estructura de compuestos orgánicos. Tablas de espectros". p. 13-17

## FIGURA A3.4

### ABSORCIONES CARACTERÍSTICAS DE GRUPOS FUNCIONALES EN IR

#### APENDICE 2B

#### Absorciones características de grupos funcionales en infrarrojo

Grupo	Intensidad <sup>a</sup>	Rango (cm <sup>-1</sup> )	Grupo	Intensidad <sup>a</sup>	Rango (cm <sup>-1</sup> )
<b>A. Cromóforo de hidrocarburo</b>					
<b>1. Tensión C—H</b>					
a. Alcano	m-s	2962-2853	d. $\alpha,\beta$ -insaturada, cíclica:		
b. Alqueno, monosustituido (vinilo)	m	3040-3010	anillo de 6 miembros (o más)	s	1685-1665
	y	3095-3075	anillo de 5 miembros	s	1725-1708
Alqueno, disustituido, <i>cis</i>	m	3040-3010	e. Insaturada $\alpha,\beta, \alpha',\beta'$ , acíclica	s	1670-1663
Alqueno, disustituido, <i>trans</i>	m	3040-3010	f. Arilica	s	1700-1680
Alqueno, disustituido, <i>gem</i>	m	3095-3075	g. Diarilica	s	1670-1660
Alqueno, trisustituido,	m	3040-3010	h. $\alpha$ -dicetonas	s	1730-1710
c. Alquino	s	~3300	i. $\beta$ -dicetonas (enólicas)	s	1640-1540
d. Aromático	v	~3030	j. 1,4-quinonas	s	1690-1660
<b>2. Flexión C—H</b>			k. Cetonas	s	~2150
a. C—H de alcano	w	~1340	<b>2. Aldehídos</b>		
—CH <sub>2</sub> — de alcano	m	1485-1445	a. Vibraciones de tensión de carbonilo:		
—CH <sub>3</sub> de alcano	m	1470-1430	Saturado, alifático	s	1740-1720
	y	1380-1370	$\alpha,\beta$ -insaturado, alifático	s	1705-1680
Alcano, <i>gem</i> -dimetil	s	1385-1380	$\alpha,\beta,\gamma,\delta$ -insaturado, alifático	s	1680-1660
	y	1370-1365	Arilicos	s	1715-1695
Alcano, <i>ter</i> -butilo	m	1395-1385	b. Vibraciones de tensión C—H,	w	2900-2820
	y	~1365	dos bandas	y w	2775-2700
b. Alqueno, monosustituido (vinilo)	s	995-985	<b>3. Vibraciones de tensión de ésteres</b>		
	s	915-905	a. Saturado, acíclico	s	1750-1735
	y	1420-1410	b. Saturado, cíclico	s	1750-1735
Alqueno, disustituido, <i>cis</i>	s	~690	$\delta$ -lactonas (y anillos mayores)	s	1750-1735
Alqueno, disustituido, <i>trans</i>	s	970-960	$\gamma$ -lactonas	s	1780-1760
	y	1310-1295	$\beta$ -lactonas	s	~1820
Alqueno, disustituido, <i>gem</i>	s	895-885	c. No saturados:		
Alqueno, trisustituido	s	840-790	falta traducción	s	1800-1770
c. Alquino	s	~630	$\alpha,\beta$ -insaturados y arilicos	s	1730-1717
d. Aromático, tipo de sustitución: <sup>b</sup>			$\delta$ -lactona $\alpha,\beta$ -insaturada	s	1730-1717
cinco átomos de hidrógeno adyacentes	v, s	~750	$\gamma$ -lactona $\alpha,\beta$ -insaturada	s	1760-1740
	v, s	~700	$\gamma$ -lactona $\beta,\gamma$ -insaturada	s	~1800
cuatro átomos de hidrógeno adyacentes	v, s	~750	d. $\alpha$ -cetoésteres	s	1755-1740
tres átomos de hidrógeno adyacentes	v, m	~780	falta traducción	s	~1650
dos átomos de hidrógeno adyacentes	v, m	~830	f. Carbonatos	s	1780-1740
un átomo de hidrógeno	v, w	~880	<b>4. Ácidos carboxílicos</b>		
<b>3. Tensión del enlace C—C</b>			a. Vibraciones de tensión de carbonilo:		
a. Alqueno, no conjugado	v	1680-1620	Alifático saturado	s	1725-1700
Alqueno, monosustituido (vinilo)	m	~1645	Alifático $\alpha,\beta$ -insaturado	s	1715-1690
Alqueno, disustituido, <i>cis</i>	m	~1658	De arilo	s	1700-1680
Alqueno, disustituido, <i>trans</i>	m	~1675	b. Tensión de hidroxilo (enlazado),	w	2700-2500
Alqueno, disustituido, <i>gem</i>	m	~1653	varias bandas		
Alqueno, trisustituido	m	~1669	c. Tensión de anión carboxilato	s	1610-1550
Alqueno, tetrasustituido	w	~1669		y s	1400-1300
Dieno	w	~1650	<b>5. Vibraciones de tensión de anhídrido</b>		
	y	~1600	a. Saturado, acíclico	s	1850-1800
b. Alquino, monosustituido	m	2140-2100		y s	1790-1740
Alquino, disustituido	v, w	2260-2190	b. $\alpha,\beta$ -insaturado y de arilo, acíclico	s	1830-1780
c. Aleno	m	~1960		y s	1770-1720
	y	~1060	c. Saturado, anillo de 5 miembros	s	1870-1820
	y	~1600		y s	1800-1750
	v	~1580	d. $\alpha,\beta$ -insaturado anillo de 5 miembros	s	1850-1800
	m	~1500		y s	1830-1780
	y	~1450	<b>6. Vibraciones de tensión de halogenuro de acilo</b>		
<b>B. Cromóforo de carbonilo</b>			a. Fluoruros de acilo		~1850
<b>1. Vibraciones de tensión de cetona</b>			b. Cloruros de acilo		~1795
a. Saturada, acíclica	s	1725-1705	c. Bromuros de acilo	s	~1810
b. Saturada, cíclica			d. $\alpha,\beta$ -insaturados y de arilo	s	1780-1750
anillo de 6 miembros (o más)	s	1725-1705		y m	1750-1720
anillo de 5 miembros	s	1750-1740			
anillo de 4 miembros	s	~1775			
c. $\alpha,\beta$ -insaturada, acíclica	s	1685-1665			

<sup>a</sup> Abreviaturas: s = fuerte, m = mediana, w = débil, v = variable, b = ancha, sh = ancha, - = aproximadamente.

<sup>b</sup> Los bencenos sustituidos muestran también bandas débiles en la región de 2000 a 1670 cm<sup>-1</sup>.

(Continuación)

Grupo	Intensidad <sup>a</sup>	Rango (cm <sup>-1</sup> )	Grupo	Intensidad <sup>a</sup>	Rango (cm <sup>-1</sup> )
<b>7. Amidas</b>			<b>2. Aminas</b>		
<b>a. Vibraciones de tensión de carbonilo:</b>			<b>a. Vibraciones de tensión N—H:</b>		
Primarias, sólidas y en solución concentrada	s	~ 1650	Primarias, libres; dos bandas	m	~ 3500
Primarias, en solución diluida	s	~ 1690	Secundarias, libres; una banda	y m	~ 3400
Secundarias, sólidas y en solución concentrada	s	1680-1630	Iminas (=N—N); una banda	m	3500-3310
Secundarias, en solución diluida	s	1700-1670	Sales de amina	m	3400-3300
Terciarias, sólidas y todas sus soluciones	s	1670-1630	<b>b. Vibraciones de flexión N—H:</b>		
δ-lactamas cíclicas	s	~ 1680	Primarias	s-m	1650-1590
γ-lactamas cíclicas	s	~ 1700	Secundarias	w	1650-1550
γ-lactamas cíclicas, fusionadas a otro anillo	s	1750-1700	Sales de amina	s	1600-1575
β-lactamas cíclicas	s	1760-1730		y s	~ 1500
β-lactamas cíclicas fusionadas a otro anillo, solución diluida	s	1780-1770	<b>c. Vibraciones C—N:</b>		
Ureas, acíclicas	s	~ 1660	Aromáticas, primarias	s	1340-1250
Ureas, cíclicas, anillo de 6 miembros	s	~ 1640	Aromáticas, secundarias	s	1350-1280
Ureas, cíclicas, anillo de 5 miembros	s	~ 1720	Aromáticas, terciarias	s	1360-1310
Úretanos	s	1740-1690	Alifáticas	w	1220-1020
Ímidas, acíclicas	s	~ 1710		y w	~ 1410
	y s	~ 1700	<b>3. Compuestos insaturados nitrogenados</b>		
Ímidas, cíclicas, anillo de 6 miembros	y s	~ 1710	<b>a. Vibraciones de tensión C≡N</b>		
	y s	~ 1700	Alquil nitrilos	m	2260-2240
Ímidas, cíclicas α,β-insaturadas, anillo de 6 miembros	s	~ 1730	Alquil nitrilos α,β-insaturados	m	2235-2215
	y s	~ 1670	falta traducción	m	2240-2220
Ímidas, cíclicas, anillo de 5 miembros	s	~ 1770	Isocianatos	m	2275-2240
	y s	~ 1700	Isocianuros	m	2220-2070
Ímidas, cíclicas α,β-insaturadas, anillo de 5 miembros	s	~ 1790	<b>b. Vibraciones de tensión &gt;C=N—(iminas, oxinas)</b>		
	y s	~ 1710	Compuestos de alquilo		1690-1640
<b>b. Vibraciones de tensión N—H:</b>			Compuestos α,β-insaturados		1660-1630
Primarias, libres; dos bandas	m	~ 3500	<b>c. Vibraciones de tensión —N=N—, compuestos azo</b>	v	1630-1575
	y m	~ 3400	<b>d. Vibraciones de tensión —N=C=N—, diimida</b>	s	2155-2130
Primarias, enlazadas; dos bandas	m	~ 3350	<b>e. Vibraciones de tensión —N<sub>3</sub>, azidas</b>		
	y m	~ 3180			2160-2120
Secundarias, libres; una banda	m	~ 3430	<b>f. Compuestos nitro, C—NO<sub>2</sub>:</b>	y w	1340-1180
Secundarias, enlazadas; una banda	m	3320-3140	aromáticos	s	1570-1500
<b>c. Vibraciones de tensión N—H:</b>			alifáticos	y s	1370-1300
Amidas primarias, solución diluida	s	1620-1590		y s	1380-1370
Amidas secundarias	s	1550-1510	<b>g. Nitratos, O—NO<sub>2</sub></b>	s	1650-1600
<b>C. Grupos cromóforos diversos</b>				y s	1300-1250
<b>I. Alcoholes y fenoles</b>			<b>h. C—NO, compuestos nitroso</b>	s	1600-1500
<b>a. Vibraciones de tensión O—H:</b>			<b>i. O—NO, nitritos</b>	s	1680-1650
O—H libre	v, sh	3650-3590		y s	1625-1610
Unidos por puentes de hidrógeno intermoleculares (cambian al diluir)			<b>4. Compuestos halogenados, vibraciones de tensión C—X</b>		
compuestos con un puente asociación polimérica	v, sh s, b	3550-3450 3400-3200	<b>a. C—F</b>	s	1400-1000
Unidos por puentes de hidrógeno intermoleculares (no cambian al diluir)			<b>b. C—Cl</b>	s	800-600
compuestos con un puente	v, sh	3570-3450	<b>c. C—Br</b>	s	600-500
compuestos quelato	w, b	3200-2500	<b>d. C—I</b>	s	~ 500
<b>b. Vibraciones de flexión O—H y tensión C—O:</b>			<b>5. Compuestos de azufre</b>		
Alcoholes primarios	s	~ 1050	<b>a. Vibraciones de tensión S—H</b>	w	2600-2550
	y s	1350-1260	<b>b. Vibraciones de tensión</b>	s	1200-1050
Alcoholes secundarios	s	~ 1100	<b>c. Vibraciones de tensión</b>		
	y s	1350-1260	sulfóxidos	s	1070-1030
Alcoholes terciarios	s	~ 1150	sulfonas	s	1160-1140
	y s	1410-1310		y s	1350-1300
Fenoles	s	~ 1200	sulfitos	s	1230-1150
	y s	1410-1310		y s	1430-1350
			cloruros de sulfonylo	s	1185-1165
				y s	1370-1340
			sulfonamidas	s	1180-1140
				y s	1350-1300
			ácidos sulfónicos	s	1210-1150
				s	1060-1030
				y s	~ 650

<sup>a</sup> Abreviaturas: s = fuerte, m = mediana, w = débil, v = variable, b = ancha, sh = angosta, ~ = aproximadamente.

**FIGURA A3.5**  
**FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE ABSORCIÓN IR**

Bond	Compound type	Frequency range, cm <sup>-1</sup>	Reference
C—H	Alkanes	2850–2960 1350–1470	Sec. 17.5
C—H	Alkenes	3020–3080 ( <i>m</i> ) 675–1000	Sec. 17.5
C—H	Aromatic rings	3000–3100 ( <i>m</i> ) 675–870	Sec. 17.5
C—H	Alkynes	3300	Sec. 17.5
C=C	Alkenes	1640–1680 ( <i>v</i> )	Sec. 17.5
C≡C	Alkynes	2100–2260 ( <i>v</i> )	Sec. 17.5
C=C	Aromatic rings	1500, 1600 ( <i>v</i> )	Sec. 17.5
C—O	Alcohols, ethers, carboxylic acids, esters	1080–1300	Sec. 17.6 Sec. 17.7 Sec. 19.22 Sec. 20.25
C=O	Aldehydes, ketones, carboxylic acids, esters	1690–1760	Sec. 18.23 Sec. 19.22 Sec. 20.25
O—H	Monomeric alcohols, phenols	3610–3640 ( <i>v</i> )	Sec. 17.6 Sec. 24.17
	Hydrogen-bonded alcohols, phenols	3200–3600 ( <i>broad</i> )	Sec. 17.6 Sec. 24.17
	Carboxylic acids	2500–3000 ( <i>broad</i> )	Sec. 19.22
N—H	Amines	3300–3500 ( <i>m</i> )	Sec. 23.21
C—N	Amines	1180–1360	Sec. 23.21
C≡N	Nitriles	2210–2260 ( <i>v</i> )	
—NO <sub>2</sub>	Nitro compounds	1515–1560 1345–1385	

<sup>a</sup> All bands strong unless marked: *m*, moderate; *v*, variable

monosubstituted	690–710 cm <sup>-1</sup> 730–770	<i>m</i> -disubstituted	690–710 cm <sup>-1</sup> 750–810
<i>o</i> -disubstituted	735–770	<i>p</i> -disubstituted	810–840

Fuente : THORNTON MORRISON, Robert, et. al. (2002). Química Orgánica. p. 412, 445

**ANEXO A3.4**  
**CONSTANTES FÍSICAS DEL PET**



**FIGURA A3.6**  
**CONSTANTES FÍSICAS DEL PET**

Properties of films are given for Mylar® Type A (DuPont) biaxially oriented and crystalline films. Properties of filaments are given for various products.

Property	Value	Ref.
<b>Birefringence of Filaments.</b> (sodium light)*		1
<b>Draw ratio</b>		
2.0	0.040	
3.0	0.092	
4.0	0.167	
5.0	0.193	
<b>Bursting Strength.</b> (g cm <sup>-1</sup> ) 1 mil film, 23°C,	46 × 10 <sup>2</sup>	2,3
<b>Breilouin Light Scattering.</b> See Ref. 4		
<b>Coefficient of Friction.</b> (film)		
Kinetic, film to film	0.45	2,3
film to steel	0.14	6
<b>Coefficient of Thermal Conductivity.</b> (film) (W m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) (Also see Thermal conductivity). 100°C,	37.5 × 10 <sup>-3</sup>	2,3

\*Value sensitive to semicrystalline morphology.

Property	Value	Ref.
<b>Coefficient of Thermal Expansion.</b> (film), (K <sup>-1</sup> )		
20°C–50°C	1.7 × 10 <sup>-3</sup>	2,3
Melt	6.55 × 10 <sup>-4</sup>	5
<b>Coefficient of Volume Expansion.</b> (K <sup>-1</sup> )		7
Crystalline, below T <sub>g</sub>	1.7 × 10 <sup>-4</sup>	
Crystalline, above T <sub>g</sub>	3.94 × 10 <sup>-4</sup>	
<b>Compressibility.</b> (melt) (MPa) × 10 <sup>6</sup>	6.99	5
<b>Conductivity for Direct Current.</b> (See Fig. 1 overleaf)		
<b>Crystallographic Data.</b> See Unit cell.		
<b>Density.</b> (Mg m <sup>-3</sup> ) = (g cm <sup>-3</sup> )		
Amorphous, non-oriented	1.335	9
Partly cryst., non-oriented	1.385	9
Partly cryst., oriented	1.390	9
Highly cryst., non-oriented	1.420	10
Calculated, crystal	1.515 (1.501)	11 12
<b>Dielectric Strength.</b> (film) (V cm <sup>-1</sup> )		2,3
23°C, 60 Hz	2.95 × 10 <sup>6</sup>	
150°C, 60 Hz	2.75 × 10 <sup>6</sup>	

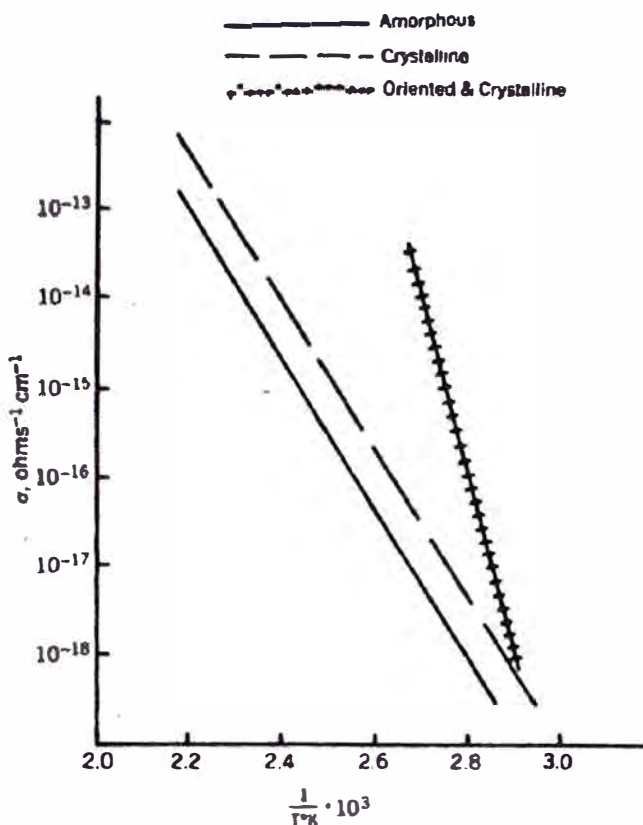


FIGURE 1 Direct current conductivity at various temperatures and degrees of orientation and crystallinity (8)

Property	Value	Ref.
<b>Dielectric Constant.</b> (film)		2,3
23°C, 60 Hz	3.30	
23°C, 1 kHz	3.25	
23°C, 1 MHz	3.0	
23°C, 1 GHz	2.8	
150°C, 60 Hz	3.7	
<b>Dissipation Factor.</b> (film)		2,3
23°C, 60 Hz	0.0025	
23°C, 1 kHz	0.0050	
23°C, 1 MHz	0.016	
23°C, 1 GHz	0.003	
150°C, 60 Hz	0.00040	
<b>Elastic Constants.</b> (filaments) (Pa <sup>-1</sup> )		13
<b>Oriented</b>		
S <sub>11</sub> transverse	16 × 10 <sup>-10</sup>	
S <sub>33</sub> longitudinal	0.71 × 10 <sup>-10</sup>	
S <sub>44</sub> torsional	14 × 10 <sup>-10</sup>	
S <sub>12</sub>	-5.8 × 10 <sup>-10</sup>	
S <sub>13</sub>	-0.31 × 10 <sup>-10</sup>	
<b>Unoriented</b>		
S <sub>11</sub> or S <sub>33</sub> extensional	4.4 × 10 <sup>-10</sup>	
S <sub>44</sub> torsional	11 × 10 <sup>-10</sup>	

\*Value sensitive to semicrystalline morphology.

Property	Value	Ref.
<b>Enthalpy of Fusion</b> (kJ mol <sup>-1</sup> )	2.69	10
<b>Entropy of Fusion.</b> (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	48.6	10
<b>Folding Endurance.</b> (film) (cycles) 23°C,	300,000	2,3
<b>Glass Transition Temperature.*</b> (°C)		
Amorphous	67	7,14
Crystalline	81	14
Crystalline and oriented	125	15
<b>Heat capacity.</b> See Specific heat.		
<b>Heat of Combustion.</b> (kJ kg <sup>-1</sup> )	-2.16 × 10 <sup>4</sup>	16
<b>Heat of Sorption.</b> (film) (kJ kg <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )		
Carbon dioxide	-3.1 × 10 <sup>4</sup>	17
Methane	-2.3 × 10 <sup>4</sup>	
<b>Hygroscopic Coefficient of Expansion.</b> (film) (cm cm <sup>-1</sup> % R.H. <sup>-1</sup> )		
20-92% RH,	1.1 × 10 <sup>-3</sup>	2,3
<b>Impact Strength.</b> (film) (J m <sup>-1</sup> ) 23°C,	2.4 × 10 <sup>2</sup>	2,3
<b>Infrared Spectra.</b> See Refs.		18-25
<b>Insulation Resistance.</b> (film) (Mohm mfd)		
100°C	5000	26,27,28
130°C	400	
150°C	100	
<b>Melting Point.</b> (°C)		
equilibrium	280(310)	11(12)
Commercial PET (metastable crystallites)	250-265	2,3
Effect of diethylene glycol content	See Fig. 2 overleaf	29
<b>Melt Viscosity vs. Intrinsic Viscosity</b>		
<b>Melt Viscosity (Pa s) 280°C*</b>	<b>Intrinsic Viscosity in <i>o</i>-tetrachloroethane/phenol (40/60), (ml g<sup>-1</sup>), 30°C</b>	
0.45	10	
4.5	20	
25.0	30	
95.0	40	
115.0	50	
145.0	60	
800.0	70	
1180.0	80	
20000.0	90	

\*Taken from Figure 14 of Ref. 2.

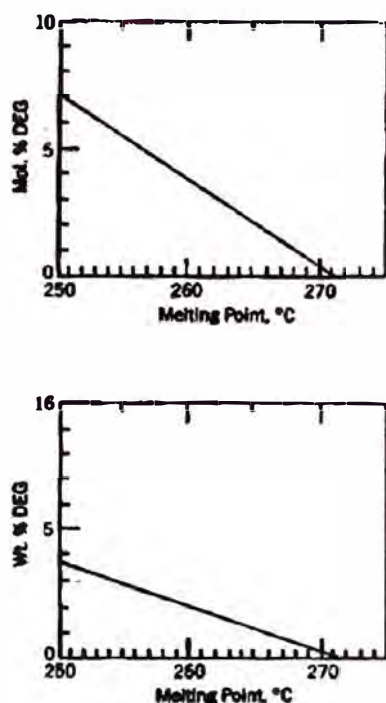
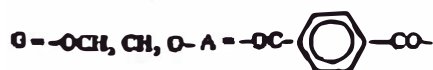


Figure 2 Effect of diethylene glycol (DEG) content on melting point. Melting point (°C) = 271 - 3 (mol% deg) (2,29).

Property	Value	Ref.	
Absolute Absorption (%) transmission in water at 25°C for 1 w,	0.8	27,28	
Nuclear Magnetic Resonance Spectrum.	See refs. 13,30,31.		
<b>Oligomers—cyclic</b>			
Structure	Molecular Weight	Melting Point (°C)	Ref.
H(GA) <sub>1</sub> OH	210.2	178	32
H(GA) <sub>2</sub> OH	402.4	200-205	32
H(GA) <sub>3</sub> OH	594.6	219-223	32
		179-183	33
		186	34
H(GA) <sub>1</sub> -G-H	254.2	109-110	32
H(GA) <sub>2</sub> -G-H	446.4	173-174	32
H(GA) <sub>3</sub> -G-H	638.6	200-205	32
H(GA) <sub>4</sub> -G-H	830.8	213-216	32
H(GA) <sub>5</sub> -G-H	1023.0	216-220	32
HO-A-(GA) <sub>1</sub> OH	358.3	>360	32
HO-A-(GA) <sub>2</sub> OH	550.5	280-281	32
HO-A-(GA) <sub>3</sub> OH	742.7	268-270	32
HO-A-(GA) <sub>4</sub> OH	934.9	252-255	32
HO-A-(GA) <sub>5</sub> OH	1127.1	233-236	32



\*\*Value sensitive to spherulitic morphology.

Property	Value	Ref.
<b>Oligomers—cyclic</b>		
CYCLIC DIMER		
Melting point (°C)	175, 224	33
	229	35
Unit cell (nm)	a = 0.858 b = 1.275 c = 0.801 β = 90.7°	35
CYCLIC TRIMER (B-TYPE CRYSTAL)		
Melting point, (°C)	319	33
	317-320	36
	321	37
Crystalline transition, (°C) (A-type → B-type)	199	37
	195	38
CYCLIC TETRAMER		
Melting point (°C)	326	33
CYCLIC PENTAMER		
Melting point (°C)	256	33
<b>Oligomers—Isolation.</b> See Ref. 39.		
Optical Haze. ** (ASTM D1003-61)	See Ref.	40
Permeability. (film)	See corresponding chapter in this handbook.	
Photoacoustic Spectroscopy.	See Ref.	41
Polarizer's Ratio. (Oriented filaments)		13
Extrinsic	0.44	
Transverse	0.37	
Raman Spectra.		21,42-46
Frequency, (cm <sup>-1</sup> )	1730	
	1618	
	1096	
	857	
	632	
	278	
Refractive Index. (film), (Na Light)		2
Amorphous, 25°C	1.5760	
Crystalline and biaxially oriented, 23°C	1.64	
Refractive Index Increment (specific). (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> ) (In hexafluoroisopropanol solution)	0.257 ± 0.004	47
Resistivity.		2,3
Surface, (ohm cm <sup>-2</sup> )		
23°C, 30% R.H.	2 × 10 <sup>13</sup>	
23°C, 80% R.H.	2 × 10 <sup>11</sup>	
Volume, (ohm cm)		
23°C	10 <sup>10</sup>	
150°C	10 <sup>14</sup>	

Property	Value	Ref.	
<i>Rheological Spectrum.</i> See Refs.		48,49	
<i>Service Temperature.</i> (°C)	-60 to +150	2,3	
<i>Shrinkage.</i> (film) (%) 150°C, 30 min.	2-3	3	
<i>Solubility Constants.</i> (film) (cm <sup>3</sup> STPcm <sup>-3</sup> Pa <sup>-1</sup> ) × 10 <sup>3</sup>		17	
3 mil, 25°C nitrogen	4.3		
oxygen	7.5		
methane	19.7		
argon	0.8		
<i>Solvents.</i> See chapter "Solvents-Nonsolvents" in this handbook.			
<i>Solvent-Nonsolvent for Fractionation</i>			
<b>Solvent</b>	<b>Nonsolvent</b>		
<i>o</i> -Chlorophenol	Hexane	50	
Phenol/tetrachloroethane (1:1)	Gasoline	51	
Phenol/chlorobenzene (1:1)	Gasoline	52	
Phenol/dichloroethane (2:3)	Benzene	53	
Phenol	Cyclohexane	54	
Phenol	Ethanol	55	
<i>Sonic Velocity.</i> (filaments) (m s <sup>-1</sup> )		56	
10 kHz unoriented	1400		
highly oriented	5900		
<i>Specific Heat.</i> (kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) C <sub>p</sub> = 4.184 (A + (B × T)).		57	
<b>Condition of Polymer</b>	<b>A</b>	<b>B × 10<sup>4</sup></b>	<b>Effective Temperature, T(°C)</b>
Molten polymer	0.3243	5.65	270 to 290
Flake	0.2502	9.40	-20 to 60
Yarn (undrawn)	0.2469	10.07	-5 to 60
Yarn (drawn)	0.2482	9.89	-10 to 35
Yarn (drawn + annealed)	0.2431	9.23	-10 to 80
	0.2502	9.31	100 to 200
1.2-40K	See Ref.		58
Below 1K	See Ref.		59
<i>Stick Point Temperature.</i> (°C)	230-240	4	
<i>Stress-Strain Curves for Filaments.</i> See Refs.		60,61.	
<i>Surface Tension.</i> (mN m <sup>-1</sup> ) = (dyn cm <sup>-1</sup> )			
Solid/liquids, 25°C	39.5	62	
	42.1	63	
Molten, 290°C	27 ± 3	64	

Property	Value	Ref.	
<i>Tear Strength.</i> (film) (g m <sup>-1</sup> )			
Initial, 23°C	23.6 × 10 <sup>6</sup>	2,3	
Propagating, 23°C	0.59 × 10 <sup>6</sup>		
<i>Tensile Strength.</i> (film) (MPa)	= (N mm <sup>-2</sup> )		
23°C,	172	2,3	
<i>Thermal Conductivity.</i> (film) (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) 33°C	0.147	65	
1.2-40 K	See Ref.	58	
Below 1 K	See Ref.	59	
<i>Thermal Diffusivity.</i> (film) (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )			
33°C,	9.29 × 10 <sup>-4</sup>	65	
<i>Torsional Modulus.</i> (MPa) = (N mm <sup>-2</sup> )			
Oriented filament,	720	13	
<i>Transition Temperatures.</i> (°C)			
From second moment (NMR) measurements on fibers			
Unoriented	120 ± 5	13,31	
Oriented	140 ± 10		
<i>Unit Cell.</i> (nm)		66,11,12	
	Previously (Ref. 66) Accepted	Corrected Ref. (11)	Corrected Ref. (12)
X-RAY DIFFRACTION (291 K)			
a	0.456	0.448	0.450
b	0.594	0.585	0.590
c	1.075	1.075	1.076
α	98.5°	99.5°	100.3°
β	118°	118.4°	118.6°
γ	112°	111.2°	110.8°
ELECTRON DIFFRACTION (Ref 67)			
a	0.452		67
b	0.598		
C	1.077		
α	101		
β	118°		
γ	111°		
<i>Viscosity-Molecular Weight Relationship.</i> See Sections I, II.			
<i>Young's Modulus.</i> (MPa) = (N mm <sup>-2</sup> )			
Oriented Filament extensional	1.41 × 10 <sup>4</sup>		13
transverse	0.063 × 10 <sup>4</sup>		
<i>Zero Strength Temperature.</i> (film) (°C)	248		68

## SECTION I INTRINSIC VISCOSITY-MOLECULAR WEIGHT RELATIONSHIPS (UNFRACTIONATED)\*

Solvent	T(°C)	K × 10 <sup>4</sup>	a	Molecular Weight Range × 10 <sup>-3</sup>	Method	Ref.
Trichloroacetic acid	30	4.33	0.68	26-118	Light scattering	69
Tetrachloroethane/phenol (5:3)	30	2.29	0.73	26-118	Light scattering	69
o-Chlorophenol	25	6.56	0.73	12-25	Osmometry	70
o-Chlorophenol	25	3.0	0.77	13-28	End group	71
Tetrachloroethane/phenol (1:1)	25	2.1	0.82	5-25	End group	72
Tetrachloroethane/phenol (1:1)	20	1.27	0.86	5-21	End group	73
Tetrachloroethane/phenol (1:1)	20	7.55	0.685	3-30	End group	54
Phenol/2,4,6-trichlorophenol (10:7)	29.8	2.10	0.80	1-8	End group	74
o-Chlorophenol	25	6.31	0.658	6-70	Size exclusion chromatography	
					Light scattering	75
Phenol/tetrachloroethane (3:2)	25	7.44	0.648	6-70	Light scattering	75
Hexafluoroisopropanol	25	5.20	0.695	6-70	Light scattering	75
Pentafluorophenol	25	3.85	0.723	6-70	Light scattering	75
Hexafluoroisopropanol/pentafluorophenol (1:1)	25	4.50	0.703	6-70	Light scattering	75
Methylene chloride/hexafluoroisopropanol (7:3)	-	4.03	0.691	-	Size exclusion chromatography	
					Chromatography	76
o-Chlorophenol/chloroform (1:3)	25	1.49	0.56	9-100	Chromatography	77

\*( $\eta$ ) = K × M<sup>a</sup>.

## TABLE II INTRINSIC VISCOSITY-MOLECULAR WEIGHT RELATIONSHIPS (FRACTIONATED)\*

Solvent	T(°C)	K × 10 <sup>4</sup>	a	Molecular Weight Range × 10 <sup>-3</sup>	Method	Ref.
o-Chlorophenol	25	1.9	0.81	15-38	End group	78
Dichloroacetic acid	25	67	0.47	15-38	End group	78
Trifluoroacetic acid	25	14	0.64	15-38	End group	78
Phenol/tetrachloroethane (2:3)	25	14	0.64	15-38	End group	78
o-Chlorophenol	25	4.25	0.69	20-100	Sedimentation & diffusion	79
Tetrachloroethane/phenol (1:1)	20	0.9	0.87	5-21	End group	73
Phenol/dichloroethane (2:3)	20	0.92	0.85	8-30	End group	53
o-Chlorophenol/chloroform (1:9)	25	0.584	0.91	4-30	Size exclusion chromatography	80

\*( $\eta$ ) = K × M<sup>a</sup>.

Fuente: LAWTON, E. L., et. al. (1989). "Constantes Físicas del PET". En Manual de Polímeros; BRANDRUP, J. Editorial John Wiley & Sons, New York; USA. p. 101-105

**ANEXO A3.5**  
**MSDS BIS HIDROXIETIL TEREFALATO**

**SIGMA-ALDRICH**

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 3.0 Fecha de revisión 11.04.2008

Fecha de impresión 04.02.2010

ENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O EL PREPARADO Y DE LA SOCIEDAD O EMPRESA**

Nombre del producto : Bis(2-hydroxyethyl) terephthalate  
Referencia : 465151  
Marca : Aldrich  
Compañía : **Sigma-Aldrich**  
3050 Spruce Street  
SAINT LOUIS MO 63103  
USA  
Teléfono : +18003255832  
Fax : +18003255052  
Teléfono de Urgencia : (314) 776-6555

**2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS**

No es una sustancia o una preparación peligrosa según la Directiva de la CE 67/548/CEE o 1999/45/CE.

**3. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES**

Formula : C<sub>12</sub>H<sub>14</sub>O<sub>6</sub>  
Peso molecular : 254,24 g/mol

No. CAS	No. CE	No. Indice	Clasificación	Concentración
<b>Bis(hydroxyethyl) terephthalate</b>				
959-26-2	213-497-6	-	-	-

**4. PRIMEROS AUXILIOS**

**Si es inhalado**

Si aspiró, mueva la persona al aire fresco. Si no respira, administrar respiración artificial.

**En caso de contacto con la piel**

Eliminar lavando con jabón y mucha agua.

**En caso de contacto con los ojos**

Lavarse abundantemente los ojos con agua como medida de precaución.

**Si es tragado**

Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Enjuague la boca con agua.

**5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS**

**Medios de extinción adecuados**

Usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, productos químicos secos o dióxido de carbono.

**Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios**

Si es necesario, usar equipo de respiración autónomo para la lucha contra el fuego.

**6. MEDIDAS EN CASO DE LIBERACIÓN ACCIDENTAL**

**Precauciones personales**

Evite la formación de polvo.

**Precauciones para la protección del medio ambiente**

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

**Métodos de limpieza**

Limpiar y traspalar. Guardar en contenedores apropiados y cerrados para su eliminación.

**7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO**

**Manipulación**

Debe disponer de extracción adecuada en aquellos lugares en los que se forma polvo. **Disposiciones normales de protección preventivas de incendio.**

**Almacenamiento**

Almacenar en un lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado.

**8. CONTROLES DE LA EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL**

**Protección personal**

**Protección respiratoria**

Protección respiratoria no requerida. Donde la protección sea deseada Usar respiradores y componentes testados y aprobados bajo los estándares gubernamentales apropiados como NIOSH (EEUU) o CEN (UE)

**Protección de las manos**

En caso de contacto prolongado o repetido, utilizar guantes.

**Protección de los ojos**

**Gafas de seguridad**

**Medidas de higiene**

**Procedimiento general de higiene industrial.**

**9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS**

**Aspecto**

Estado físico                      **sólido**

**Datos de Seguridad**

pH    sin datos disponibles

Punto de fusión                      **106 - 109 °C**

Punto de ebullición                      **sin datos disponibles**

**Punto de ignición**                      sin datos disponibles

Temperatura de ignición                      **sin datos disponibles**

**Límite de explosión, inferior**                      sin datos disponibles

Límite de explosión, superior                      **sin datos disponibles**

**Solubilidad en agua**                      **sin datos disponibles**

**10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD**

**Estabilidad en almacén**

Estable bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas.



**Materias que deben evitarse**

Agentes oxidantes fuertes, Bases

**Productos de descomposición peligrosos**

Productos de descomposición peligrosos formados en condiciones de incendio. - Óxidos de carbono

**11. INFORMACION TOXICOLOGICA**

**Toxicidad aguda**

sin datos disponibles

**Irritación y corrosión**

sin datos disponibles

**Sensibilización**

sin datos disponibles

**Exposición crónica**

IARC: **No se identifica ningún componente de este producto, que presente niveles mayores que o igual a 0,1% como agente carcinógeno humano probable, posible o confirmado por la (IARC) Agencia Internacional de Investigaciones sobre Carcinógenos.**

**Efectos potenciales para la Salud**

<b>Inhalación</b>	<b>Puede ser nocivo si se inhala. Puede provocar una irritación en el tracto respiratorio.</b>
<b>Piel</b>	<b>Puede ser nocivo si es absorbido por la piel. Puede provocar una irritación de la piel.</b>
<b>Ojos</b>	<b>Puede provocar una irritación en los ojos.</b>
<b>Ingestión</b>	<b>Puede ser nocivo si es tragado.</b>

**12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA**

**Informaciones sobre eliminación (permanencia y degradabilidad)**

sin datos disponibles

**Efectos ecotoxicológicos**

sin datos disponibles

**Información complementaria sobre la ecología**

sin datos disponibles

**13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN**

**Producto**

Observar todos los reglamentos estatales y locales sobre la protección del medio ambiente.

**Envases contaminados**

Eliminar como producto no usado.

**14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE**

**ADR/RID**

Mercancía no peligrosa

**IMDG**

Mercancía no peligrosa

**IATA**  
Mercancía no peligrosa

**15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA**

**Etiquetado de acuerdo con las Directivas CE**

Otra datos:

El producto no necesita ser etiquetado de acuerdo con las directivas de la Comunidad Europea ó las respectivas leyes nacionales.

**16. OTRA INFORMACIÓN**

**Otra datos**

Copyright 2008 Sigma-Aldrich. Se autoriza la reproducción en número ilimitado de copias para uso exclusivamente interno.

**La información indicada arriba se considera correcta pero no pretende ser exhaustiva y deberá utilizarse únicamente como orientación. Sigma-Aldrich, no responderá por ningún daño resultante de la manipulación o contacto con el producto indicado arriba. Ver otros términos y condiciones de venta en el reverso de la factura o de la nota de entrega.**

**ANEXO A3.6**  
**MSDS ETILENGLICOL**

**SIGMA-ALDRICH**

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**

de acuerdo con la Directiva 2001/58/CE  
Versión 3.0 Fecha de revisión 12.05.2007  
Fecha de impresión 04.02.2010

ENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O PREPARADO Y DE LA SOCIEDAD O EMPRESA**

Nombre del producto : **Ethylene glycol**  
Referencia : 324558  
Marca : Sigma-Aldrich  
Compañía : Sigma-Aldrich  
3050 Spruce Street  
SAINT LOUIS MO 63103  
USA  
Teléfono : +18003255832  
Fax : +18003255052  
Teléfono de Urgencia : (314) 776-6555

**2. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES**

Formula : C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>  
Peso molecular : 62,07 g/mol

No. CAS	No. CE	No. Indice	Clasificación	Concentración [%]
<b>Ethylene glycol</b>				
107-21-1	203-473-3	603-027-00-1	Xn, R22	-

**3. IDENTIFICACION DE LOS PELIGROS**

**Advertencia de riesgo para el hombre y para el medio ambiente**  
Nocivo por ingestión.

**4. PRIMEROS AUXILIOS**

**Consejo general**

Consultar un médico. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

**Si es inhalado**

Si aspiró, mueva la persona al aire fresco. Si no respira, administrar respiración artificial. Consultar un médico.

**En caso de contacto con la piel**

Eliminar lavando con jabón y mucha agua. Consultar un médico.

**En caso de contacto con los ojos**

Lávese a fondo con agua abundante durante 15 minutos por lo menos y consulte al médico.

**Si es tragado**

Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Enjuague la boca con agua. Consultar un médico.

**5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS**

**Medios de extinción adecuados**

Usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, productos químicos secos o dióxido de carbono.

**Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios**  
Si es necesario, llevar aparato respiratorio autónomo para la lucha contra el fuego.

**6. MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL**

**Precauciones personales**

Utilícese equipo de protección individual. Evitar respirar los vapores, la neblina o el gas. Asegúrese una ventilación apropiada.

**Precauciones para la protección del medio ambiente**

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

**Métodos de limpieza**

Empapar con material absorbente inerte y eliminar como un desecho especial. Guardar en contenedores apropiados y cerrados para su eliminación.

**7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO**

**Manipulación**

Evitar la inhalación de vapor o neblina.  
Disposiciones normales de protección preventivas de incendio.

**Almacenamiento**

Almacenar en un lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado.

**8. CONTROLES DE LA EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL**

**Protección personal**

**Protección respiratoria**

Donde el asesoramiento de riesgo muestre que los respiradores purificadores de aire son apropiados, usar un respirador que cubra toda la cara con combinación multi-proposito (EEUU) o tipo ABEK (EN 14387) respiradores de cartucho de respuesto para controles de ingeniería. Si el respirador es la única protección, usar un respirador suministrado que cubra toda la cara Usar respiradores y componentes testados y aprobados bajo los standards gubernamentales apropiados como NIOSH (EEUU) o CEN (UE)

**Protección de las manos**

Manipular con guantes. Los guantes de protección seleccionados deben de cumplir con las especificaciones de la Directiva de la UE 89/689/CEE y de la norma EN 374 derivado de ello.

**Protección de los ojos**

Gafas de seguridad

**Protección de la piel y del cuerpo**

Elegir una protección para el cuerpo según la cantidad y la concentración de la sustancia peligrosa en el lugar de trabajo.

**Medidas de higiene**

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. Lávense las manos antes de los descansos y después de terminar la jornada laboral.

**9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS**

**Aspecto**

Estado físico	líquido
Color	incolore

**Datos de Seguridad**

pH	sin datos disponibles
Punto de fusión	-13 °C
Punto de ebullición	195 - 198 °C a 1.013 hPa

Punto de inflamación	111 °C - copa cerrada
Temperatura de ignición	400 °C
Límite de explosión, inferior	3,2 %(V)
Límite de explosión, superior	15,3 %(V)
Presión de vapor	0,11 hPa a 20 °C 0,13 hPa a 20 °C
Densidad	1,1130 g/cm <sup>3</sup>
Hidrosolubilidad	totalmente miscible soluble
Coefficiente de reparto (n-octanol/agua)	log Pow: -1,36

## 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

### Estabilidad en almacén

Estable bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas.

### Materias que deben evitarse

Acidos fuertes, Agentes oxidantes fuertes, Bases fuertes, Aldehídos, Aluminio

### Productos de descomposición peligrosos

**Productos de descomposición peligrosos formados en condiciones de incendio.**  
Óxidos de carbono

## 11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

### Toxicidad aguda

DL50 Oral - rata - 4.700 mg/kg

DL50 Cutáneo - conejo - 10.626 mg/kg

### Irritación y corrosión

Ojos - conejo - Ligera irritación en los ojos - 24 h

### Sensibilización

sin datos disponibles

### Exposición crónica

Probablemente no cancerígeno

Los experimentos del laboratorio han mostrado efectos teratogenic.

La exposición excesiva puede provocar trastornos del aparato reproductor, según pruebas realizadas en animales de laboratorio.

### Signos y Síntomas de la Exposición

Los primeros síntomas después de la ingestión son similares a la inebriación alcohólica y son seguidos de náuseas, vómitos, dolor abdominal, debilidad, sensación dolorosa de los músculos, insuficiencia respiratoria, convulsiones, colapso cardiovascular, edema pulmonar, tetania por hipocalcemia y acidosis metabólica severa. En ausencia de tratamiento la muerte puede producirse en un plazo de 8 a 24 horas. Las víctimas que sobreviven al período de toxicidad inicial suelen sufrir insuficiencia renal así como lesiones cerebrales y hepáticas., La exposición al alcohol, o su consumo, puede incrementar los efectos tóxicos.

#### Efectos potenciales para la Salud

<b>Inhalación</b>	Puede ser nocivo si se inhala. Puede provocar una irritación en el tracto respiratorio
<b>Piel</b>	Puede ser nocivo si es absorbido por la piel. Puede provocar una irritación de la piel.
<b>Ojos</b>	Puede provocar una irritación en los ojos.
<b>Ingestión</b>	Nocivo por ingestión.
<b>Órganos de referencia</b>	Hígado, Sistema cardiovascular, Ojos, Riñón, Sistema nervioso central,

## 12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

### Informaciones sobre eliminación (permanencia y degradabilidad)

sin datos disponibles

<b>Bioacumulación</b>	Observaciones: No debe bioacumularse. otros peces - 61 d Factor de bioconcentración (BCF): 0,60
-----------------------	---

### Efectos ecotoxicológicos

<b>Toxicidad para los peces</b>	CL50 - Oncorhynchus mykiss (Trucha irisada) - 18.500 mg/l - 96 h
	CL50 - Leuciscus idus (Carpa dorada) - > 10.000 mg/l - 48 h
	NOEC - Pimephales promelas (Piscardo de cabeza gorda) - 32.000 mg/l - 7 d NOEC - Pimephales promelas (Piscardo de cabeza gorda) - 39.140 mg/l - 96 h
<b>Toxicidad para las dafnias y otros invertebrados acuáticos.</b>	CE50 - Daphnia magna (Pulga de mar grande) - 74.000 mg/l - 24 h
	NOEC - Dafnia - 24.000 mg/l - 48 h CL50 - Daphnia magna (Pulga de mar grande) - 41.000 mg/l - 48 h

### Información complementaria sobre la ecología

sin datos disponibles

## 13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN

### Producto

Observar todos los reglamentos estatales y locales sobre la protección del medio ambiente. Para la eliminación de este producto, dirigirse a un servicio profesional autorizado. Disolver o mezclar el producto con un solvente combustible y quemarlo en un incinerador apto para productos químicos provisto de postquemador y lavador.

### Envases contaminados

Eliminar como producto no usado.

## 14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

### ADR/RID

Mercancía no peligrosa

**IMDG**

Mercancía no peligrosa

**IATA**

Mercancía no peligrosa

**15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA**

**Etiquetado de acuerdo con las Directivas CE**

Etiqueta CE

Símbolos de peligro

Xn Nocivo

Frase(s) - R

R22 Nocivo por ingestión.

**16. OTRA INFORMACIÓN**

**Información adicional**

Copyright 2007 Sigma-Aldrich. Se autoriza la reproducción en número ilimitado de copias para uso exclusivamente interno.

La información indicada arriba se considera correcta pero no pretende ser exhaustiva y deberá utilizarse únicamente como orientación. Sigma-Aldrich, no responderá por ningún daño resultante de la manipulación o contacto con el producto indicado arriba. Ver otros términos y condiciones de venta en el reverso de la factura o de la nota de entrega.



**ANEXO A3.7**  
**MSDS ACETATO DE ZINC**

**SIGMA-ALDRICH**

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 3.0 Fecha de revisión 01.01.2009

Fecha de impresión 04.02.2010

ENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O EL PREPARADO Y DE LA SOCIEDAD O EMPRESA**

Nombre del producto : Zinc acetate  
Referencia : 383317  
Marca : Aldrich  
Compañía : Sigma-Aldrich  
3050 Spruce Street  
SAINT LOUIS MO 63103  
USA  
Teléfono : +18003255832  
Fax : +18003255052  
Teléfono de Urgencia : (314) 776-6555

**2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS**

**Advertencia de riesgo para el hombre y para el medio ambiente**

Nocivo por ingestión. Irrita los ojos. Muy tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

**3. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES**

Formula : C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>4</sub>Zn  
Peso molecular : 183,48 g/mol

No. CAS	No. CE	No. Indice	Clasificación	Concentración
<b>Zinc di(acetate)</b>				
557-34-6	209-170-2	-	Xn, N, R22 - R36 - R50/53	-

**4. PRIMEROS AUXILIOS**

**Consejo general**

Consultar un médico. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

**Si es inhalado**

Si aspiró, mueva la persona al aire fresco. Si no respira, administrar respiración artificial. Consultar un médico.

**En caso de contacto con la piel**

Eliminar lavando con jabón y mucha agua. Consultar un médico.

**En caso de contacto con los ojos**

Lávese a fondo con agua abundante durante 15 minutos por lo menos y consulte al médico.

**Si es tragado**

Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Enjuague la boca con agua. Consultar un médico.

**5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS**

**Medios de extinción adecuados**

Usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, productos químicos secos o dióxido de carbono.

**Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios**  
Si es necesario, usar equipo de respiración autónomo para la lucha contra el fuego.

## 6. MEDIDAS EN CASO DE LIBERACION ACCIDENTAL

### Precauciones personales

Utilícese equipo de protección individual. Evite la formación de polvo. Evitar respirar el polvo. Asegúrese una ventilación apropiada.

### Precauciones para la protección del medio ambiente

Impedir nuevos escapes o derrames de forma segura. No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado. La descarga en el ambiente debe ser evitada.

### Métodos de limpieza

Recoger y preparar la eliminación sin originar polvo. Guardar en contenedores apropiados y cerrados para su eliminación.

## 7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

### Manipulación

Evítese el contacto con los ojos y la piel. Evítese la formación de polvo y aerosoles. Debe disponer de extracción adecuada en aquellos lugares en los que se forma polvo. Disposiciones normales de protección preventivas de incendio.

### Almacenamiento

Almacenar en un lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado.

## 8. CONTROLES DE LA EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

### Protección personal

#### Protección respiratoria

Donde el asesoramiento de riesgo muestre que los respiradores purificadores de aire son los apropiados, usar máscara de polvo tipo N95 (EEUU) o tipo P1 (EN 143) Usar respiradores y componetes testados y aprobados bajo los estandards gubernamentales apropiados como NIOSH (EEUU) o CEN (UE)

#### Protección de las manos

Los guantes de protección seleccionados deben de cumplir con las especificaciones de la Directiva de la UE 89/686/CEE y de la norma EN 374 derivado de ello. Manipular con guantes.

#### Protección de los ojos

Gafas de seguridad

#### Protección de la piel y del cuerpo

Elegir una protección para el cuerpo según la cantidad y la concentración de la sustancia peligrosa en el lugar de trabajo.

#### Medidas de higiene

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. Lávense las manos antes de los descansos y después de terminar la jornada laboral.

## 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

### Aspecto

Estado físico                      sólido

### Datos de Seguridad

pH    sin datos disponibles

Punto de fusión                      sin datos disponibles

Punto de ebullición                      sin datos disponibles

Punto de ignición                      sin datos disponibles

Temperatura de ignición	sin datos disponibles
Límite de explosión, inferior	sin datos disponibles
Límite de explosión, superior	sin datos disponibles
Solubilidad en agua	sin datos disponibles

## 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

### Estabilidad en almacén

Estable bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas.

### Materias que deben evitarse

Agentes oxidantes fuertes

### Productos de descomposición peligrosos

Productos de descomposición peligrosos formados en condiciones de incendio. - Óxidos de carbono, Cinc/óxidos de cinc

## 11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

### Toxicidad aguda

DL50 Oral - rata - 794 mg/kg

### Irritación y corrosión

sin datos disponibles

### Sensibilización

sin datos disponibles

### Exposición crónica

IARC: No se identifica ningún componente de este producto, que presente niveles mayores que o igual a 0,1% como agente carcinógeno humano probable, posible o confirmado por la (IARC) Agencia Internacional de Investigaciones sobre Carcinógenos.

Genotoxicidad in vitro - ratón - linfocito  
mutación en microorganismos

Genotoxicidad in vitro - ratón - linfocito  
mutación en células somáticas de mamíferos

Toxicidad a la reproducción - rata - Subcutáneo  
Efectos sobre el Aparato Reproductor: Espermatogénesis (incluyendo material genético, morfología, motilidad y recuento de los espermatozoides)

### Signos y Síntomas de la Exposición

Según nuestras informaciones, creemos que no se han investigado adecuadamente las propiedades químicas, físicas y toxicológicas.

### Efectos potenciales para la Salud

<b>Inhalación</b>	Puede ser nocivo si se inhala. Puede provocar una irritación en el tracto respiratorio.
<b>Piel</b>	Puede ser nocivo si es absorbido por la piel. Puede provocar una irritación de la piel.
<b>Ojos</b>	Provoca una irritación en los ojos.
<b>Ingestión</b>	Nocivo por ingestión.

**Información Adicional**  
RTECS: AK1500000

**12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA**

**Informaciones sobre eliminación (permanencia y degradabilidad)**

sin datos disponibles

**Efectos ecotoxicológicos**

Toxicidad para los peces      mortalidad LOEC - Pimephales promelas (Piscardo de cabeza gorda) - 0,43 mg/l - 8 d

CL50 - Pimephales promelas (Piscardo de cabeza gorda) - 0,88 mg/l - 96 h

**Información complementaria sobre la ecología**

Muy tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

**13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN**

**Producto**

Observar todos los reglamentos estatales y locales sobre la protección del medio ambiente. Para la eliminación de este producto, dirigirse a un servicio profesional autorizado. Disolver o mezclar el producto con un solvente combustible y quemarlo en un incinerador apto para productos químicos provisto de postquemador y lavador.

**Envases contaminados**

Eliminar como producto no usado.

**14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE**

**ADR/RID**

Número ONU: 3077 Clase: 9

Grupo de clasificación: III

Nombre propio del transporte: ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS SUBSTANCE, SOLID, N.O.S. (Zinc di(acetate))

**IMDG**

Número ONU: 3077 Clase: 9

Grupo de clasificación: III EMS-No: F-A, S-F

Nombre propio del transporte: ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS SUBSTANCE, SOLID, N.O.S. (Zinc di(acetate))

Contaminante marino: No

**IATA**

Número ONU: 3077 Clase: 9

Grupo de clasificación: III

Nombre propio del transporte: Environmentally hazardous substance, solid n.o.s. (Zinc di(acetate))

**15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA**

**Etiquetado de acuerdo con las Directivas CE**

**Símbolos de peligro**

Xn      Nocivo  
N      Peligroso para el medio ambiente

**Frase(s) - R**

R22      Nocivo por ingestión.  
R36      Irrita los ojos.  
R50/53      Muy tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

Frase(s) - S

S26

En caso de contacto con los ojos, lávense inmediata y abundantemente con agua y acúdase a un médico.

S60

Elimínense el producto y su recipiente como residuos peligrosos.

S61

Evítese su liberación al medio ambiente. Recábense instrucciones específicas de la ficha de datos de seguridad.

**16. OTRA INFORMACIÓN**

**Otra datos**

Copyright 2008 Sigma-Aldrich. Se autoriza la reproducción en número ilimitado de copias para uso exclusivamente interno.

La información indicada arriba se considera correcta pero no pretende ser exhaustiva y deberá utilizarse únicamente como orientación. Sigma-Aldrich, no responderá por ningún daño resultante de la manipulación o contacto con el producto indicado arriba. Ver otros términos y condiciones de venta en el reverso de la factura o de la nota de entrega.