



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUIMICA E INDUSTRIAS
EXTRACTIVAS

**Obtención del *bis-hidroxi Etilen Tereftalato* (BHET) por el
método de glicolisis a partir del PET Post-Consumo
grado botella.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO INDUSTRIAL

Presentan:

Karla Ivonne Zamudio Lara

Luis Ángel Cuervo Laurian

Director de Tesis: Dra. Carmen Magdalena Reza San Germán

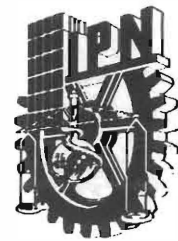
México D.F. Junio de 2013





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO



T-061-13

México, D. F., 21 de mayo del 2013.

A los C. Pasantes:

KARLA IVONNE ZAMUDIO LARA

LUIS ÁNGEL CUERVO LAURIAN

Avenida 505 No. 72

Unidad San Juan de Aragón 1ª Sección

Gustavo A. Madero

México, D.F.

C.P. 07969

Boleta:

2008320486

2008320861

Carrera:

IQI

IQI

Generación:

2007-2011

2007-2011

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que la C. **Dra. Carmen Magdalena Reza San Germán** sea orientadora en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Colectiva**, con el título y contenido siguiente:

“Obtención del bis-hidroxi Etilen Tereftalato (BHET) por el método de glicolisis a partir del PET Post-Consumo grado botella”.

Resumen.

Introducción.

I.- Antecedentes del polietileno tereftalato.

II.- Reciclado del polietileno tereftalato.

III.- Desarrollo experimental y resultados.

Conclusiones.

Bibliografía.

Se concede un plazo máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el Jurado asignado.


Ing. Antonio Salvador Pérez Cárdenas


Presidente de la Academia de
Fisicoquímica


Dra. Carmen Magdalena Reza San Germán

Directora de Tesis
Ced. Prof. 2727878


Lic. Guillermo Alberto de la Torre Arteaga

Jefe del Departamento de Evaluación y
Seguimiento Académico

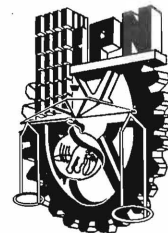

Dr. Ricardo Gerardo Sánchez Alvarado

Subdirector Académico Interino



SECRETARÍA
DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO



T-061-13

México, D. F., 17 de junio del 2013.

A los C. Pasantes:

KARLA IVONNE ZAMUDIO LARA
LUIS ÁNGEL CUERVO LAURIAN
PRESENTE

Boleta:
2008320486
2008320861

Carrera:
IQI
IQI

Generación:
2007-2011
2007-2011

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:


“Obtención del bis-hidroxi Etilen Tereftalato (BHET) por el método de glicolisis a partir del PET Post-Consumo grado botella”

encontramos que el citado Trabajo de **Tesis Colectiva**, reúne los requisitos para autorizar el Examen Profesional y **PROCEDER A SU IMPRESIÓN** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente

JURADO


Dra. Lucia Gracia Díaz Barriga Arceo
Presidente


Dra. María Elena Manríquez Ramírez
Vocal


Dra. Carmen Magdalena Reza San German
Secretario

c.c.p.- Expediente
GATA/rcr



Índice:

	Página
Resumen	1
Fundamentación	2
Objetivos	3
Hipótesis	3
Introducción	4
Capítulo I Antecedentes del Polietileno Tereftalato	5
1.1 Historia del PET	5
1.2 Concepto del PET	7
1.2.1 Propiedades Físicoquímicas del PET	12
1.3 Principales usos de la botella de PET	18
1.3.1 PET grado botella	18
1.3.2 PET grado fibra	19
1.3.3 PET grado película	19
1.3.4 PET grado lámina	20
1.3.4.1 Lamina de PET amorfo	20
1.3.4.2 Lamina de PET cristalino	20
1.3.4.3 Lamina de PET espumado	21
Capítulo II Reciclado del Polietilen Tereftalato.	22
2.1 Consumo de productos en PET	22



2.2 Reciclaje de PET	25
2.3 Tipos de reciclado	28
2.4 Usos del PET reciclado	40
Capítulo III Desarrollo Experimental y Resultados	42
Observaciones realizadas durante el experimento	48
RESULTADOS	50
Conclusiones	66
Bibliografía	67



Índice de figuras:

	Página
Figura 1:Sistema de identificación de envases de PET	7
Figura 2: Nomenclatura del PET	7
Figura 3: Proceso de elaboración de envases PET	8
Figura 4 Representación del comportamiento de acuerdo al tiempo de residencia contra concentración de acetaldehído	11
Figura 5:representación del comportamiento de acuerdo a la temperatura contra el acetaldehído residual	12
Figura 6: representación de la velocidad de cristalización del PET	14
Figura 7: Representación esquemática de un termoplástico amorfo	15
Figura 8:Representacion esquemática de un termoplástico cristalino	16
Figura 9: Botellas de PET	17
Figura 10:Crecimiento en el consumo de PET en México	23
Figura 11:Representacion gráfica del uso del PET en México	25
Figura 12: símbolo del PET	26
Figura 13: Manejo del PET en escala industrial	27
Figura 14: Reciclaje mecánico	29
Figura 15: Reacción de Metanolisis	31
Figura 16:Diagrama de bloques la despolimerización por Metanolisis	31
Figura 17: Reacción de Hidrolisis	32
Figura 18 Diagrama de bloques de la despolimerización por hidrólisis ácida.	33
Figura 19: Reacción de Glicolisis.	36
Figura 20: Diagrama de bloques del método de Glicolisis.	38
Figura 21: Representación de la despolimerización por gasificación	40
Figura 22: Principales usos del PET reciclado	41
Figura 23: Botella de PET post-consumo en tiras	42
Figura 24: Enfriamiento de la reacción a temperatura ambiente	44
Figura 25:Agregado de agua destilada en exceso	44
Figura 26: Primera Filtración	45
Figura 27: Muestra a 4°C	46
Figura 28: Torta seca después de 72 horas a 60°C	47
Figura 29: Espectrofotómetro de Infrarrojo Spectrum Two	50
Figura 30: ATR del Equipo de infrarrojo Spectrum Two	51
Figura 31: Efecto del cristal ATR sobre la muestra	51
Figura 32: Modos de vibración de los enlaces moleculares en infrarrojo	52
Figura 33: Regiones típicas del espectro infrarrojo	53
Figura 34: Resumen de las frecuencias de tensión en el infrarrojo	53



Figura 35: Espectro IR del Etilen Glicol	55
Figura 36: Espectro IR de Botella de PET de agua	56
Figura 37: Espectro IR de Acetato de Zinc	57
Figura 38 : Espectro IR de cristales obtenidos en la relación 4:1	61
Figura 39: Espectro IR de cristales obtenidos en la relación 6:1	62
Figura 40: Espectro IR de cristales obtenidos en la relación 8:1	63



Índice de tablas:

	Página
Tabla 1: Propiedades de un arreglo termoplástico amorfo	15
Tabla 2: Propiedades del PET cristalino	16
Tabla 3 Principales propiedades del PET grado lámina	21
Tabla 4: Principales uso del PET	24
Tabla 5: Tabla 5 Proporciones Etilen Glicol : PET	43
Tabla 6: Interpretación del espectro del Etilenglicol	58
Tabla 7: Interpretación del espectro del PET	59
Tabla 8: interpretación del espectro del Acetato de Zinc	59
Tabla 9: Interpretación de los espectros del BHET	64



AGRADECIMIENTOS:

A Dios por nunca olvidarse de mí, por no dejarme caer, y por permitirme estar donde estoy.

Al Instituto Politécnico Nacional y a la ESIQIE por darme la oportunidad de formar parte de su comunidad, por que al estar aquí pude conocer personas invaluableles en mi vida; por darme los conocimientos técnicos que mi profesión requiere, pero sobre todo tantas lecciones de vida.

A mi papá, a mi mamá y a mi hermana Fabiola que me han enseñado a soñar y poner los pies sobre la tierra cuando es necesario; a los que profeso profundo respeto, admiración y amor. Es para mí en este gran momento expresarles mi más grande agradecimiento por todo ese amor que ha hecho de mí una persona capaz de triunfar en la vida. Por aquellas y más preciadas palabras de aliento, sin sus consejos no lo hubiera logrado y sobre todo por el apoyo siempre incondicional.

A la Dra. Carmen Reza, por en todo momento confiar en mí, por su paciencia y por sus palabras de aliento, y sobre todo por todas las facilidades que me brindo, y además, por dejarme ser su alumna pero sobre todo su amiga.

A Miriam Estrada, por toda su ayuda, consejos, risas, y largas conversaciones en el laboratorio.

A Alfonso Hernández por toda su ayuda y regaños, y muchos momentos agradables en el laboratorio.

A la Dra. María Elena Manríquez, por darme consejos e impulsarme a terminar.

A Diana Escárcega y Anahí Gutiérrez, por ser mis mejores amigas durante la carrera, por escucharme, por aconsejarme y por darme muchos momentos de alegría.

A mi prima Lizeth Lara por confiar en mí, por sus consejos, y por impulsarme a seguir.

A Luis Cuervo, por la paciencia que me ha tenido todo este tiempo, por confiar en mí, y por estar conmigo en las buenas y en las malas, por su cariño y apoyo.

He aquí el esfuerzo de todos HEMOS TRIUNFADO!!!

Atte.: Karla Ivonne Zamudio Lara



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por haberme permitido llegar hasta esta etapa de mi vida, por darme la sabiduría y paciencia para poder culminar mis estudios y poder realizarme como profesionalista.

Agradecer a mis padres, hermanos y familia por apoyarme durante mi etapa de estudiante y proporcionarme lo necesario para continuar con mis estudios, el saber que estuvieron ahí para cuando yo lo necesite y darme la fuerza para seguir adelante.

Quiero agradecer infinitamente a la ingeniero, amiga y novia Karla Ivonne Zamudio, por ser la persona más importante quien me sostuvo durante la etapa de realización de este proyecto, por su apoyo y confianza brindada, por el cariño y paciencia.

A los docentes del Instituto Politécnico Nacional que de alguna u otra forma compartieron conmigo sus experiencias y conocimientos, lo cual ayudo a formar el profesionalista que hoy soy.

Quiero agradecer a la Dr. Carmen Reza San Germán por su gentil apoyo, experiencia y conocimiento, ya que sin ella no se hubiera materializado este proyecto, así como a la MC Miriam Estrada por sus consejos proporcionados y con ello obtener una mejor finalización del proyecto.

IQI Luis Angel Cuervo Laurian



RESUMEN:

El Polietilen Tereftalato (PET) es un material polimérico del tipo Commodity que es ampliamente utilizado para la industria del embotellado de bebidas carbonatadas y de agua principalmente, debido a las amplias propiedades que presenta, aunque su uso no se limita a esto, actualmente también se utiliza como contenedor para alimentos, entre otros, su producción, es relativamente sencilla, todo lo contrario a su reciclaje, por lo que en este trabajo se optimizara un método de reciclaje del PET post consumo, por la despolimerización mediante glicolisis, para lo cual se realizaron experimentos a nivel laboratorio probando a diferentes proporciones la relación Etilenglicol: PET, utilizando como catalizador el Acetato de Zinc.

El producto obtenido fue el *bis-hidroxi Etilen Tereftalato* (BHET) en cristales, el cual fue caracterizado por medio de IR. Este producto de reacción combinado con resina virgen de PET es ampliamente utilizado para la obtención de fibras o tejidos de poliéster, y en casos muy especiales y estrechamente regulados para contenedores de alimentos.



FUNDAMENTACIÓN:

Actualmente México es uno de los principales consumidores de agua embotellada y de bebidas carbonatadas, si se toma en cuenta que cada mexicano consume alrededor de 7 kilogramos de Polietilen tereftalato al año y una sola botella de dicho material tarda de 10 a 1000 años en degradarse, es necesario la implementación de métodos de reciclaje (físicos o químicos).

Este problema actualmente está afectando significativamente el ambiente en el que nos desenvolvemos, debido a las escasas empresas dedicadas a los procesos de reciclaje, nos hemos visto con la obligación moral de difundir información, de cómo poder ayudar a darle un uso benéfico a este material que nos está afectando y se sigue incrementando, esto con la finalidad de hacer conciencia del reciclaje, tanto a las personas para que separen sus desechos y a las empresas.



OBJETIVOS GENERALES:

Obtener bis-hidroxi Etilen Tereftalato (BHET) a partir del PET Post-Consumo, utilizando diferentes proporciones de Etilenglicol.

OBJETIVOS PARTICULARES:

- Degradar el PET mediante glicolisis utilizando como catalizador el Acetato de Zinc y obtener BHET.
- Optimizar el tiempo de reacción de la Glicolisis
- Optimizar la cantidad de Etilenglicol utilizado en la reacción.
- Caracterización del BHET por medio de la interpretación de espectros de IR.

HIPÓTESIS:

A mayor proporción de Etilenglicol mayor obtención de BHET.



INTRODUCCION:

El Polietilen Tereftalato mejor conocido en el mercado como PET, es un material polimérico desarrollado en la década de los 40's con el objetivo de poder sustituir el algodón debido a su déficit por la Segunda guerra Mundial. Su principal uso fue en la industria textil y con el paso de los años hasta a la actualidad se ocupa para el almacenamiento de alimentos y principalmente en la de bebidas como aguas y refrescos.

El uso del PET ha logrado desplazar en los últimos 20 años a materiales como el cartón, aluminio, metales pesados y desde mi punto de vista al más importante el vidrio, ya que, debido a sus propiedades mecánicas este material es más resistente al impacto y es más ligero, encontrando las industrias mayores ventajas para poder disminuir los costos de proceso y transportación.

El PET debido a sus propiedades fisicoquímicas no da la facilidad de reciclarlo, con lo cual evitamos seguir contaminando y cuidando el medio ambiente, existen diversas formas de poder aprovechar el PET, por ejemplo: la mecánica, la física y la química y actualmente la energética, siendo estos métodos los más importantes.

En este proyecto nos concentramos principalmente del reciclado químico, que es un proceso mediante reacciones químicas para regresar al PET en sus materias primas y así poder reutilizarlo para el proceso de nuevos productos.

El método que se utilizo fue el de Glicolisis, el cual fue el más recomendable para poder realizarlo a nivel laboratorio ya que no utilizamos presiones y temperaturas altas, comparadas con otros métodos.



CAPITULO I

ANTECEDENTES DEL POLIETILEN TEREFTALATO

1.1 HISTORIA DEL PET

El Polietilen Tereftalato mejor conocido como PET, es un polímero desarrollado en la década de los cuarentas, buscando una fibra sintética que sustituyera al algodón, el motivo principal del desarrollo de este material se debió a la Segunda Guerra Mundial que se vivía, ya que era difícil su importación de países Africanos principalmente de Egipto.

EL PET fue patentado como un polímero para fibra por los científicos británicos John Rex Whinfield y James Tennant Dickson en 1941, los cuales investigaron sobre los poliésteres termoplásticos en los laboratorios de la Asociación Calico Printer.

A partir de 1946 se empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido actualmente, no fue sino a partir de 1952 que se comenzó a emplear para envasar alimentos, y fue hasta 1976 cuando se abrió camino en el ámbito de los envases rígidos, con la fabricación de botellas para bebidas poco sensibles al oxígeno como los refrescos carbonatados.

Los primeros envases de PET aparecen en el mercado alrededor del año de 1977 y desde ese año hasta la actualidad el envase se ha vuelto el material ideal para la distribución moderna, en México comenzó a realizarse la fabricación alrededor de la década de los ochentas y ha tenido una muy buena aceptación; aunque cabe destacar que el PET ha tenido un crecimiento en empaques del 3.8% con respecto a 1990 hasta la fecha.



El crecimiento comercial de este material ha sido sorprendente en el uso de botellas, principalmente en el envase de bebidas carbonatadas y alimentos, esto debido a las propiedades que presenta, tiene un buen balance en la impermeabilidad a gases tales como el dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno, así como a su alta resistencia química y mecánica. Además de ser 100% reciclable.

En la actualidad la industria global del PET ha alcanzado un estado estable, pero aun presenta buen nivel de crecimiento por la gran versatilidad tecnológica y dependiente del producto a envasar, debido a que también por su diseño permite optimizar el peso del envase y adecuarlo a las necesidades requeridas.

Su escaso peso con relación al producto final requerido, llega a ser 50 veces menor que el líquido contenido, lo cual implica un ahorro importante en el transporte de mercadería hasta de un 35 % en el consumo de combustible, su peso es 28 veces menor que el del vidrio, su uso fundamentalmente se pensó debido a la seguridad que proporciona a los usuarios por las eventuales roturas de los envases.

Una de las maneras más fáciles y comunes de saber si un artículo está fabricado de PET, es buscar el símbolo que por lo regular se encuentra por debajo del producto, es un triángulo formado por flechas con el número 1 en el centro y bajo estas siglas dice "PET" o "PETE" (ver figura 1). Algunos de los productos que son almacenados en los envases de PET son refrescos, aceites comestibles, agua purificada, alimentos, aderezos, medicinas, agroquímicos, entre otros.



Figura. 1. Sistema de identificación de envases de PET.

1.2 CONCEPTO DEL PET

EL Polietileno Tereftalato (PET) (Figura 2) es un Poliéster Termoplástico que este se produce a partir de dos compuestos: el Ácido Tereftálico y Etilenglicol, aunque también se puede obtener del Dimetil Tereftalato sustituyendo al Acido Tereftálico, los cuales son puestos a reaccionar a altas temperaturas y presión para obtener la resina PET en estado amorfo.

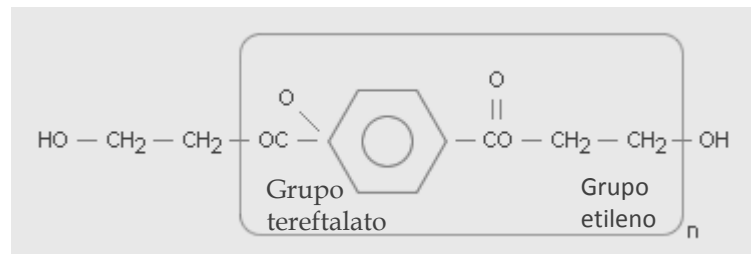


Figura 2: Nomenclatura del PET

Una particularidad del PET, es que durante el proceso de transformación se puede controlar la orientación de las cadenas poliméricas, es decir, su grado de cristalinidad mediante la temperatura de transición vítrea, cuando el PET fundido se enfría razonablemente rápido, el material se solidifica en estado amorfo, es decir, se obtiene un material con apariencia transparente. Contrariamente al enfriarlo suficientemente lento, el material al solidificarse se vuelve opaco, lo que se conoce como PET cristalino.

El polímero de PET puede ser transformado en botella mediante un proceso llamado biorientación de preformas (las moléculas se acomodan en forma de red, orientándose en dos direcciones, perpendicular y paralela al eje del envase) a través de un calentamiento controlado de una resina; esta resina se obtiene a partir de etileno y para-xileno; al realizarse el proceso, (biorientación), lo cual le da una elevada resistencia mecánica⁹. El moldeo de las preformas consiste en la inyección del polímero fundido en la cavidad del molde hasta llenarlo. Una vez lleno, la resina del polímero fundido es enfriada rápidamente para obtener así una pieza con excelente transparencia, libre de deformaciones y una magnífica exactitud dimensional lo cual es esencial para obtener botellas de excelente calidad. El PET se elabora a partir de las materias primas derivadas del petróleo, un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire²². La Figura 3 muestra el proceso de obtención del PET.

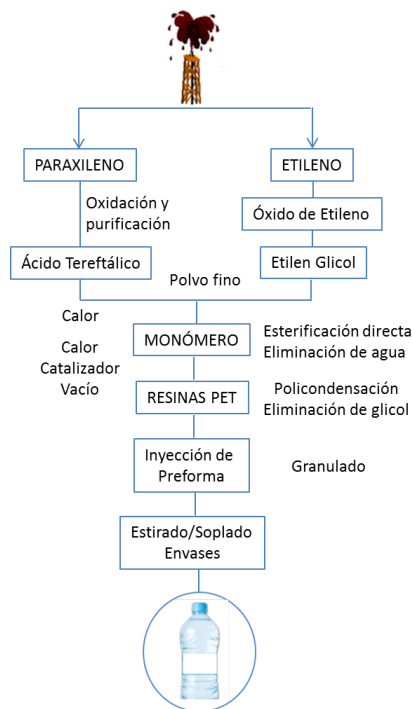


Figura 3: Proceso de elaboración de envases PET¹.



EL PET se puede obtener por diferentes síntesis, aunque comercialmente ha sido obtenido por dos métodos, cada uno de los cuales involucra la policondensación de bis(hidroxietyl) tereftalato (BHET) pero difieren en términos de la materia prima utilizada, uno de los métodos emplea dimetil tereftalato y la generación del BHET por trans-esterificación con etileno a temperaturas de 150 – 200°C, este proceso es catalizado a través de una variedad de metales como el Magnesio, Zinc, Cobalto, entre otros, al final el material producido se destila. El segundo método es el más reciente, el cual involucra la generación de BHET partiendo de la esterificación del ácido Tereftálico (TPA) con Etilenglicol, se describirá solo una de acuerdo al proceso más conocido y sencillo.

La reacción más sencilla se lleva a cabo en dos etapas, las cuales se desarrollan como sigue:

a) Síntesis del Monómero.

Hacemos reaccionar el ácido Tereftálico con un glicol de tipo etileno.



b) Poli condensación en la cual el BHET se pone a alto vacío obteniendo:



El PET se puede clasificar de acuerdo a las aplicaciones más importantes pero también de acuerdo a su naturaleza. Existen diferentes grados de resina PET (aplicación), los cuales se pueden diferenciar de acuerdo a su peso molecular, las que presentan menor peso se les denomina fibra, las que presentan mayor peso se denominan de grado Ingeniería (grado botella), aunque cabe señalar que existen aquellas que su peso se encuentra en un intervalo intermedio a las que se les denomina grado película. Existen tipos de PET (naturaleza), los cuales son los que se obtienen modificando la fórmula básica, siendo el polímero cristalino, el



amorfo y el reciclado, éste último se divide en el post industrial y el de post consumo⁶.

En la síntesis, cuando se efectúa la polimerización a medida que la cadena del polímero se comienza a alargar se libera una molécula de glicol, por lo que el peso molecular y la viscosidad van aumentando dando como efecto el poseer mayor resistencia química.

Posteriormente el PET se extruye, a través de un dado de múltiples orificios para obtener espaguetis que se enfrían en agua, los semisólidos formados se cortan en un pelletizado para obtener gránulos, éste último se utiliza como PET comercializado, algunas de las características de este material son:

- Amorfo
- Peso molecular bajo.
- Alto contenido de acetaldehído.

La propiedad física más importante de obtener es la viscosidad intrínseca, la cual es una manera de medir indirectamente el peso molecular, cuyo valor es de 0.8 ± 0.02 dl/g, correspondientes a 125 unidades repetidas por molécula. Existe una pérdida de viscosidad la cual se debe a una degradación hidrolítica, que ocurre cuando se funde el PET donde el agua se encuentra a niveles mayores a 40 ppm, también debido a la degradación térmica durante la fusión realizada del polímero antes de la inyección².

La generación de Acetaldehído (CH_3CHO) en la reacción, se da durante el proceso de fusión del PET, como una consecuencia de la degradación térmica de las moléculas de PET. El acetaldehído es un líquido incoloro, volátil (con punto de ebullición 20.8°C) y se distingue por un olor característico a frutas. En el proceso de fabricación de las preformas, el acetaldehído emigra fácilmente desde la pared de la botella y se difunde dentro de ella, las bebidas carbonatadas como el agua

mineral y los refrescos de cola son muy sensibles al acetaldehído, por lo que se debe tener un cuidado especial en este punto².

Estas características limitan el uso del PET para botellas, por lo que es necesario recurrir a la polimerización sólida, calentando el granulado, para contrarrestar las desventajas del acetaldehído, y proporcionar mejor eficiencia, facilitando el secado, así como la rapidez en el moldeo de la preforma, y así obtener una producción óptima y de alta calidad en la obtención de botellas¹¹. Estas dificultades se pueden contrarrestar secando el polímero, ya que la resina absorbe humedad, por lo que requiere de un proceso de secado antes de ser transformada. Las imágenes siguientes representan la variación del tiempo de residencia con la concentración de acetaldehído presentada en horas y en partes por millón respectivamente (Figura 4), y la representación del comportamiento de acuerdo a la temperatura contra el acetaldehído residual (figura 5)

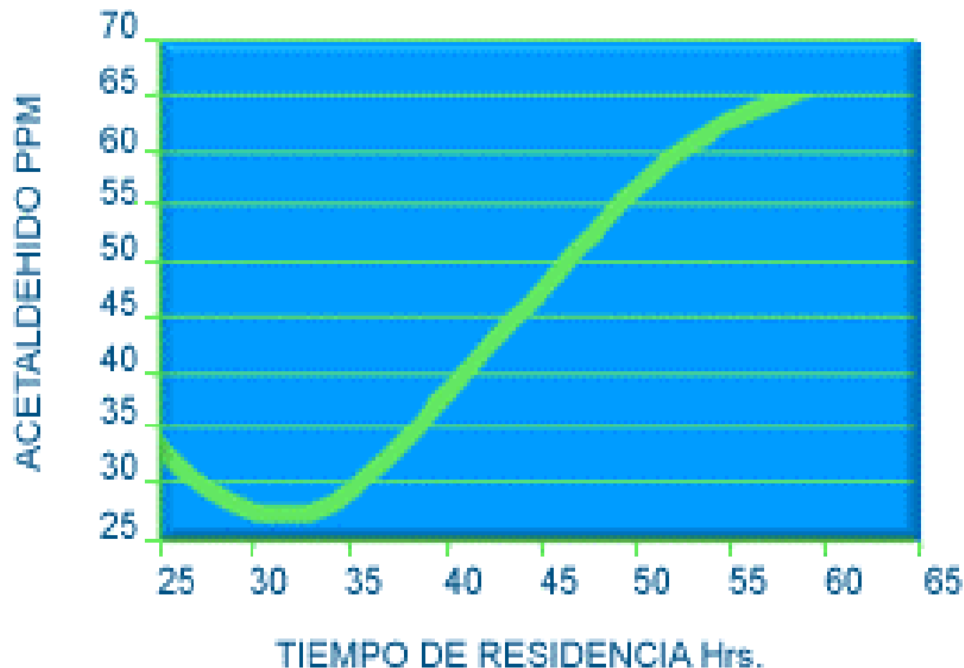


Figura 4: Representación del comportamiento de acuerdo al tiempo de residencia contra concentración de acetaldehído².

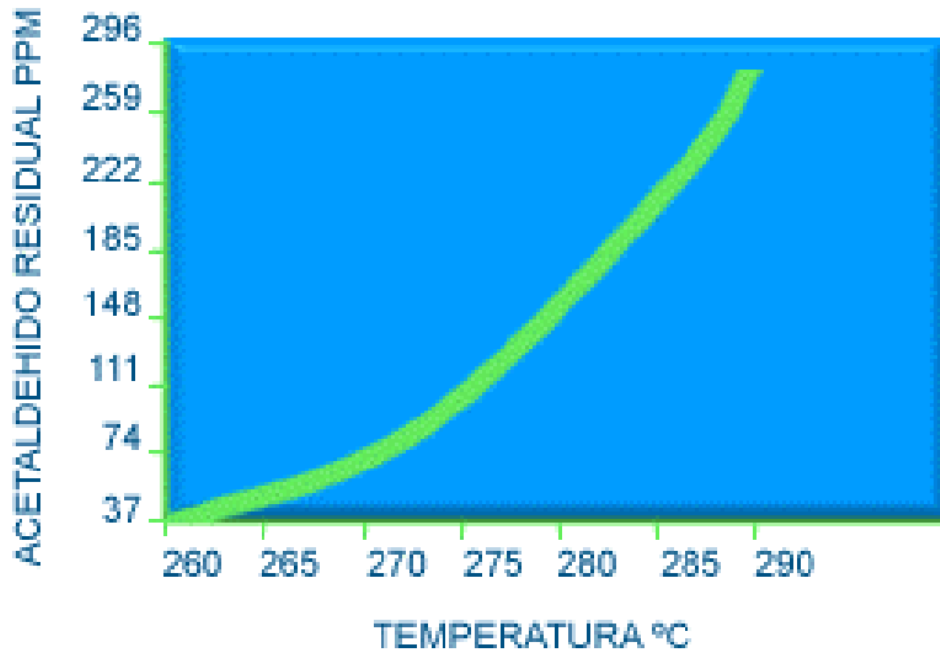


Figura 5: Representación del comportamiento de acuerdo a la temperatura contra el acetaldehído residual².

1.2.1 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL PET

Dentro del grupo de los poliésteres, se han desarrollado diferentes materiales, lo cual va de acuerdo a la utilización de materias primas o a la forma de modificarse, utilizando aditivos y otros plásticos para formar aleaciones.

En la actualidad el PET ha logrado destacar en diferentes campos de la industria, haciéndolo bueno para ser aplicado variados usos de acuerdo al nivel de cristalinidad del polímero. Una de las principales características del PET es su transparencia la cual está ligada directamente al grado de cristalinidad, siendo transparente cuando es amorfo y opaco cuando es cristalino.



Termodinámicamente las moléculas poliméricas son favorecidas a su forma cristalina al pasar de un estado de transición gomoso a vítreo, esto ocurre en un parámetro de temperaturas de 85 °C a 250 °C.

Al observar la Figura 6 podemos notar que la velocidad de cristalización es lenta a bajas y altas temperaturas, mientras que es mucho más rápida en el centro del rango, es decir entre 180°C, en cuanto a la velocidad de cristalización el PET alcanza un grado visible de cristalización en menos de 1 minuto. También se presentan dos fracciones, el de estado sólido y el de estado fundido.

El estado sólido nos indica la presencia de cristales y la estabilidad de la molécula del PET, y el estado fundido sin presencia de cristales debido a que las moléculas poseen alto nivel de energía.

Por mencionar algunos aspectos que afectan la transparencia del PET son:

- Baja temperatura de alimentación.
- Alta Presión de inyección. Las moléculas pueden alcanzar cristalización por efecto de la presión apareciendo en forma de una tira blanca.
- Velocidad de enfriamiento.

ZONA DE CRISTALIZACIÓN

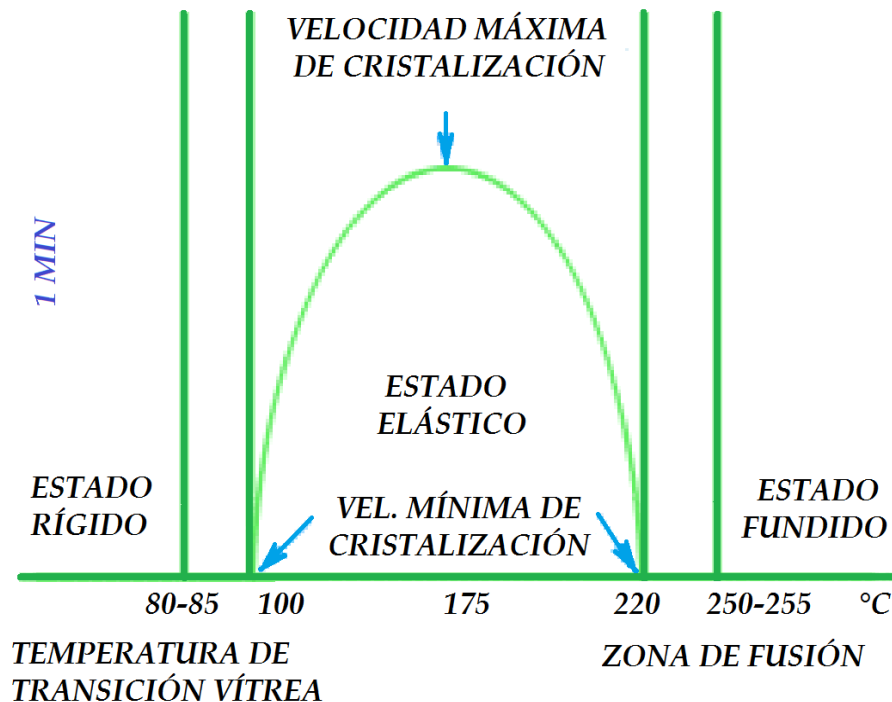


Figura 6: Representación de la velocidad de cristalización del PET³.

La calidad del PET biorientado, se aprovecha en materiales como en botellas, películas y láminas para diversas aplicaciones. En las aplicaciones donde la transparencia es un factor muy importante, donde no se utilizan pigmentos, el PET presenta una excelente claridad y brillo superficial, siendo útil para productos sensibles a la luz.

Los termoplásticos amorfos tienen la característica de que sus moléculas son ramificadas y se encuentran en completo desorden estructural. La Figura 7 muestra una imagen que representa a un termoplástico amorfo. Como podemos observar este tipo de arreglo molecular permite el paso de luz por sus espacios entreabiertos, por lo cual los plásticos amorfos son transparentes o translúcidos generalmente.

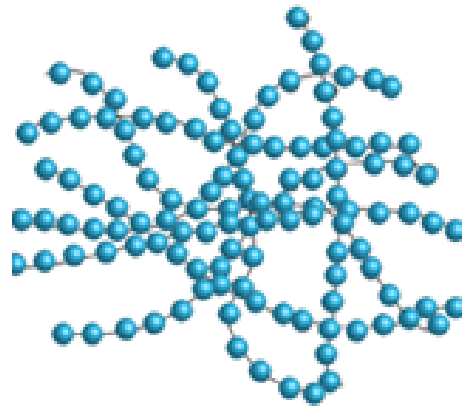


Figura 7: Representación esquemática de un termoplástico amorfo.

La tabla 1 presenta algunas de las propiedades más importantes para un arreglo termoplástico amorfo.

Tabla 1. Propiedades importantes de un arreglo termoplástico amorfo

PRINCIPALES PROPIEDADES DEL PET AMORFO		
PROPIEDADES	UNIDADES	VALOR
DENSIDAD	g/cm ³	1.34
ABSORCIÓN DE AGUA	%	0.16
RESISTENCIA A LA TENSION	N/mm ²	55
ELONGACION PUNTO DE RUPTURA	%	300
1.86 N/mm ²	°C	70
0.45 N/mm ²	°C	72
RESISTENCIA DIELECTRICA	KV/cm	450

Los termoplásticos cristalinos presentan un ordenamiento molecular relativamente bueno; en donde se puede apreciar el paralelismo dentro de las columnas moleculares, también se puede observar que las ramificaciones son más cortas (ver Figura 8). El ordenamiento del polímero equivale a un ordenamiento de

átomos en forma de cristales, los cuales al estar más cercanos y con menos espacios impiden el paso de la luz provocando una apariencia lechosa o translúcida.

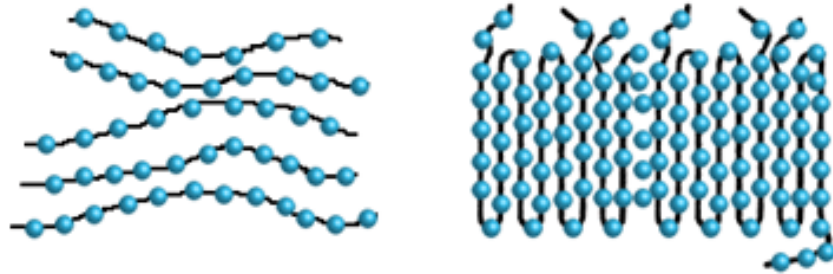


Figura 8. Representación esquemática de un termoplástico cristalino (micelar y lamelar respectivamente).

La tabla 2 presenta algunas de las propiedades más importantes para un arreglo termoplástico cristalino.

Tabla 2. Propiedades del PET Cristalino

PRINCIPALES PROPIEDADES DEL PET CRISTALINO		
PROPIEDADES	UNIDADES	VALOR
DENSIDAD	g/cm ³	1.38
ABSORCION DE AGUA	%	0.1
RESISTENCIA A LA TENSION	N/mm ²	81
ELONGACION PUNTO DE RUPTURA	%	70
TEMPERATURA DE DEFLEXION		
1.86 N/mm ²	°C	80
0.45 N/mm ²	°C	115
RESISTENCIA DIELECTRICA	KV/cm	600



EL Polietilen Tereftalato es importante en el mercado para uso en botellas y tarros, debido a las cualidades, características y propiedades que lo hacen diferente a los demás polímeros, estas propiedades son las siguientes:

- **BIORIENTACIÓN:** Permite lograr propiedades mecánicas de barrera con optimización de espesores.
- **CRISTALIZACIÓN:** El PET cristaliza muy lentamente, la velocidad de cristalización está en función de la temperatura y del peso molecular. La cristalización permite lograr resistencia térmica para utilizar bandejas termo formadas en hornos a elevadas temperaturas de cocción.
- **FACTOR BARRERA:** Es la resistencia que ofrece el material con el que está construido un envase, al paso de agentes externos al interior del mismo. Estos agentes pueden ser gases, malos olores, humedad e incluso el mismo oxígeno. El PET se ha declarado como uno de los mejores materiales para el envasado de alimentos principalmente por esta propiedad.
- **TRANSPARENCIA:** Es la alta claridad obtenida en el material en su estado natural (sin pigmentarlo), con un brillo muy elevado.
- **PESO:** Es uno de los materiales poliméricos más ligeros, en una prueba se fabricaron envases, donde el peso promedio para una botella de 1.5 L fue de 37 a 39 g, lo que para fabricar una botella semejante se han llegado a ocupar 50 g de PVC, por lo que el PET es 25% menor en peso que el PVC.
- **DEGRADACIÓN TÉRMICA:** La temperatura soportable por el PET sin llegar a la deformación y sin degradarse, es mayor a la de otros materiales poliméricos, su punto de fusión es de 244 a 254°C. El PET cristalizado tiene buena resistencia a temperaturas de hasta 230 °C.
- **RECICLADO Y RECUPERACION:** Este material tiene la ventaja de ser reciclado y recuperarlo casi al 100% para ser utilizado en diferentes



sectores de la industria, el reciclado que tiene la mayor ventaja debido a la facilidad y economía es el reciclado mecánico²².

1.3 PRINCIPALES USOS DE LA RESINA PET

1.3.1 PET grado Botella

Hoy por hoy la aplicación más importante del PET es en la de fabricación de botellas, dando lugar también al desarrollo del proceso de transformación llamado de Inyección-Soplado Biorientado, este grado de poliéster (grado botella), no necesita aditivos por lo que se considera puro e inerte, cumple con los requerimientos de la FDA (Food and Drug Administration, USA) y la BGA (Bundesgesundheitsamt, Alemania), para estar en contacto con alimentos.

Para el caso de las botellas utilizadas en bebidas carbonatadas presentan excelentes propiedades de barrera a gases, especialmente al oxígeno logrando evitar la oxidación del contenido, y contra el bióxido de carbono para el mejor almacenamiento de gases, y es 100 % reciclable. Presenta muchas propiedades favorables en cuanto a resistencia de agentes químicos, así como gran transparencia, ligereza, resistencia mecánica a la compresión y menores costos de fabricación.

Algunos de los usos comerciales se tienen:

- Refrescos
- Agua purificada
- Aceites comestibles
- Medicinas
- Productos de Limpieza
- Cosméticos.



1.3.2 PET grado Fibra

Una de las primeras aplicaciones industriales que se le dio al PET durante la segunda guerra mundial, fue en el ámbito textil, sustituyendo de cierta forma a las fibras naturales, como el algodón o el lino.

En la actualidad este material es usado para la fabricación de fibras sintéticas, como el poliéster, brindándole excelentes cualidades físicas y químicas como:

- Alta resistencia a la Tensión
- Resistencia a la Abrasión
- Buenas propiedades químicas (Hidrocarburos, Aromáticos, detergentes etc)

Pero de igual manera presenta limitaciones como:

- Difícil tintura
- Formación de pilling
- Acumulación de electricidad
- Tacto duro de Tejidos.

1.3.3 PET grado Película.

Para este tipo de materiales, generalmente se emplean capas de 12 micrometros de espesor, se utilizan junto con otros materiales en forma de recubrimientos o laminados que pueden ser metalizados, regularmente son tratados químicamente o mediante sistemas de arco eléctrico.

Algunas películas para empaques presentan una baja permeabilidad al oxígeno y a la humedad. Los materiales utilizados para el sellado en recipientes son: el polivilideno, alcohol polivinilico, óxido de aluminio o de silicio, este tipo de sellado se utiliza en la industria de alimentos, los cuales son muy sensibles a la humedad tal es el caso del café, las galletas, algunos condimentos, fármacos y polvos para la preparación de bebidas.



Las películas que son empleadas para cintas magnéticas son de 8 a 16 micrómetros de espesor, éstas suelen tener propiedades mecánicas en ambos sentidos, es decir, transversal y longitudinal. Este tipo de PET mantiene básicamente todas las propiedades del material que contiene, se utiliza en gran cantidad para la fabricación de películas utilizadas en fotografía, de rayos X, de audio, capacitores y segmentos eléctricos por mencionar los más importantes³.

1.3.4 PET grado Lámina.

Este tipo de PET se presenta en diferentes categorías: amorfo, cristalino y espumado, los recipientes termoformados se clasifican con las siglas CPET cuando es lamina cristalina y APET cuando es amorfo.

1.3.4.1 Lamina de PET amorfo

Este tipo de PET es diseñado para proveer la claridad, alta pureza, buenos agentes barrera y resistencia que requieren los empaques. Las láminas de APET tienen buena resistencia a todos los ingredientes convencionales de los alimentos por lo cual no son capaces de impartir olores ni sabores a sus contenidos, también es posible esterilizarlas por sistemas de óxido de etileno o rayos gama³.

1.3.4.2 Lamina de PET cristalino

Los contenedores de CPET presentan un alto nivel de cristalinidad y son de apariencia blanca opaca, tiene un peso molecular elevado el cual se modifica con aditivos para favorecer la resistencia al impacto, también se modifica con agentes nucleantes para elevar su velocidad de cristalización y así lograr ciclos más rápidos de moldeo.³

La tabla 3 presenta las diferencias que presentan las láminas de APET y CPET.



Tabla 3 Principales propiedades del PET grado lámina³.

PROPIEDADES	UNIDAD	A-PET	C-PET
DENSIDAD	Kg/cm ³	1.335	1.362
CRISTALINIDAD	%	----	38-40
IMPACTO DARDO@-29° C	Kg	1.125	1
ESTABILIDAD AL CALOR	°C	72	205
BARRERA AL OXÍGENO			
a_36°C	mmol/m ² sg	1.83	1.219
a_5°C	mmol/m ² sg	1.02	0.610
ENCOGIMIENTO	%	0.5	1.8

1.3.4.3 Lamina de PET espumado

Los contenedores moldeados con lámina espumada de Polietilentereftalato presentan propiedades de resistencia a altas temperatura (+204 °C), así también logra mantener sus propiedades a temperaturas de congelación, son utilizados en sectores de comida rápida (empaques), ya que representa una ventaja comercial comparada con otros materiales.³



CAPITULO II

RECICLADO DE POLIETILEN TEREFALATO (PET)

El reciclado es un proceso por medio del cual se busca darle mayor vida útil a materiales que ya fueron utilizados (desperdicios), mediante su acondicionamiento para integrarlos a un ciclo productivo especialmente como materia prima, el PET es uno de esos materiales, el cual puede ser reutilizado luego de ser procesado.

2.1 CONSUMO DE PRODUCTOS EN PET

El consumo global del PET se calcula en 12 millones de toneladas con un crecimiento anual del 6%. El problema ambiental radica en que tan solo el 20% del PET que se consume en el mundo se recicla, el resto se dispone en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto.¹²

Las botellas de PET llegaron a México a mediados de 1980. Actualmente existen 5 plantas productoras que elaboran el polímero en granulo y 190 plantas embotelladoras. Se conoce que durante el año 2000 se produjeron en las plantas mexicanas 502,100 toneladas de PET, así mismo se tienen noticias de que el crecimiento en el consumo de PET anual es del 13%, lo que se traduce que en promedio cada mexicano consume 5 botellas de PET al día (ver Figura 10).

También la asociación para promover el reciclado del PET (APREPET) estima que la misma tasa de crecimiento anual en el consumo de este tipo de plástico. De hecho, México es el tercer consumidor internacional, sólo detrás de Estados Unidos y China, pero en consumo per cápita es el segundo, con 225 botellas por habitante. Así mismo la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC) asegura que el 80% de un empaque se genera durante la extracción y producción

de la materia prima, por lo que desecharlo implica una doble huella ambiental. En nuestro país -agrega la APREPET- sólo el 40% de las botellas es reciclada; el resto termina en rellenos sanitarios o es exportado a Asia, en especial a China, donde es empleado en la fabricación de telas sintéticas⁸.

Un reciclaje nacional del PET no sólo es una medida urgente respecto de la limpieza pública y de un manejo más eficaz de la gestión integral de residuos sólidos para evitar el rebose de los rellenos sanitarios municipales. También es preciso crear beneficios al medio ambiente y fundar un pensamiento hacia una economía sustentable que ahorre materia prima y recursos energéticos.⁵

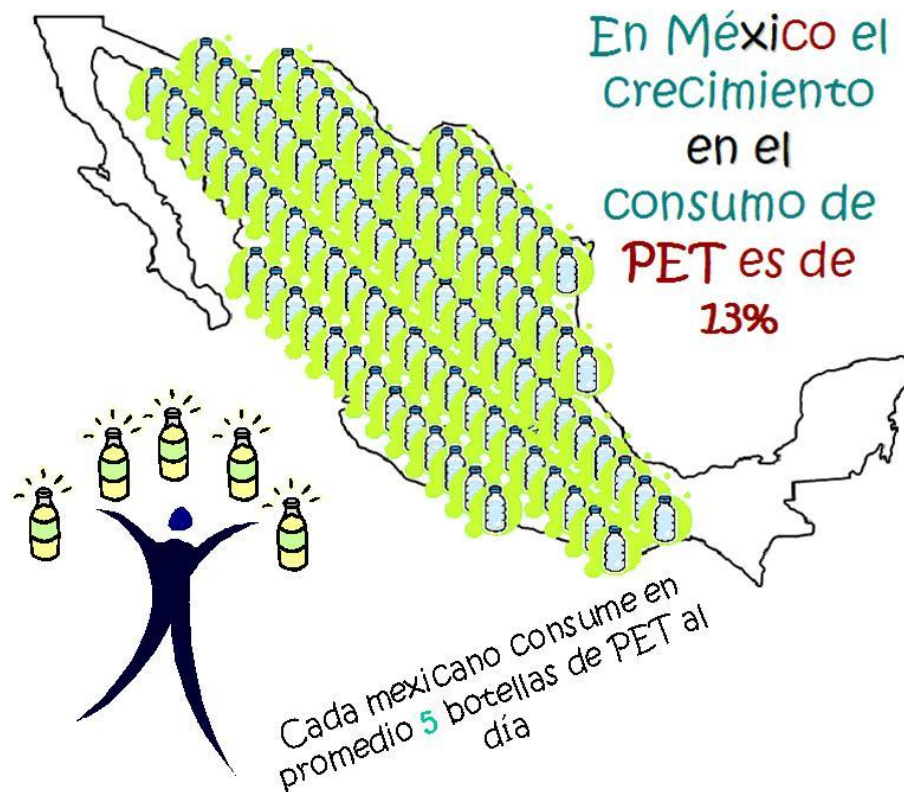


Figura 10. Crecimiento en el consumo de PET en México⁴



En el año 2000 la composición del mercado de la resina PET fue constituida de la siguiente manera:

Tabla 4: Principales usos del PET

SEGMENTO	PORCENTAJE EN EL MERCADO
REFRESCO	52.8%
AGUA PURIFICADA	17.0%
ACEITE	12.4%
ALIMENTOS	7.0%
CUIDADO PERSONAL	2.2%
AGROQUIMICOS	1.4%
LICORES	0.3%
OTROS ENVASES	1.5 %
OTRAS APLICACIONES	2.4%
PREFORMA EXPORTADA	3.0%
TOTAL	100%

De la tabla 4 podemos observar que el uso de los envases de PET es absorbido casi en su mayoría por el segmento de bebidas carbonatadas, donde representa más del 50%, mientras que en el segmento de las botellas para agua purificada es utilizado solo el 17%, a continuación presentaremos una forma gráfica para poder ser más explícitos en los datos presentados.

El PET y su productos en México

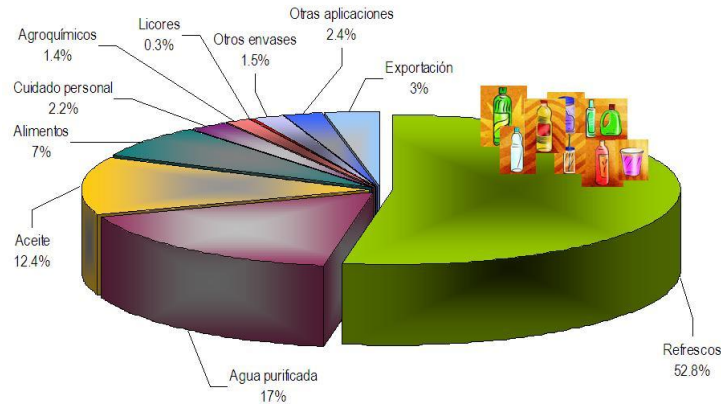


Figura 11. Representación gráfica del uso del PET en México⁴

2.2 RECICLAJE DEL PET

El PET es el material plástico más reciclado en USA y Europa, lo que representa el 25% de todas las botellas de plástico, de las cuales destacan las botellas de agua y bebidas carbonatadas. El primer efecto que genera el desperdicio masivo del PET es el efecto visual y de espacio, desde el punto de vista ambiental, este tipo de resina presenta mayores aptitudes para el reciclado, presenta el número uno dentro de los materiales utilizados para uso comercial.²²

La sociedad de los plásticos (The Society of the Plastics, SPI) desarrolló un sistema que evita la dificultad para identificar un material plástico a la vista, este sistema ha sido adoptado por todo el mundo, se basa en una simbología simple que permite la identificación, recolección y reciclamiento de los diferentes productos plásticos en el mercado.

Este símbolo está compuesto por tres fechas que forman un triángulo con un número en el centro y letras en la base (Ver Figura 12), el tamaño mínimo recomendado es de 2.5 cm para lograr su rápido reconocimiento, aunque las dimensiones reglamentadas son de 1.2 cm y 1.6 cm.³



Figura 12. Símbolo del PET¹

Para facilitar el reciclado del PET es ideal que no tenga tintes, metales, pigmentos o impresión serigráfica, ya que, es más valioso y tiene mayor uso en color transparente, todos los contaminantes hacen que se modifiquen sus propiedades, así mismo es ideal evitar el uso de tapas de Aluminio y/o PVC. El PVC en pequeñas cantidades puede llegar a contaminar grandes cantidades de PET reciclado, debido a que su temperatura de fusión es muy parecida.

Se debe tomar en cuenta que los materiales más viables a utilizar para no contaminar el PET, son el Polipropileno (PP) y el Polietileno de Alta Densidad, también se debe considerar el uso de etiquetas que sean fácilmente desprendibles mediante un proceso de lavado sencillo y de materiales como el polipropileno, el polietileno orientado (OPP), polietileno de alta, media o baja densidad (HDPE, MDPE, LDPE) y el papel.

También los adhesivos es presencia de calor degradan el material, provocando una disminución de la viscosidad y del acetaldehído (compuesto volátil fácilmente desprendible del PET, el cual propicia la degradación durante el pelletizado³. Si se toma en cuenta todo lo anterior, se obtendrá un producto más limpio y libre de



contaminantes, pudiendo comercializarse más fácilmente, considerando también que no es posible utilizarlo para botellas nuevamente.

Los envases de PET post-consumo, provienen de empresas dedicadas al acopio, las cuales reprocessan el plástico con especificaciones aptas para diversas industrias interesadas. Los envases de PET son 100 % reciclables, la característica de ser ligeros contribuye a reducir la generación de residuos y disminuye las emisiones de contaminantes en su transporte y comparada con las que produce el traslado de envases de vidrio.

Cuando hablamos de acopiar, estamos hablando de recolectar, separar, seleccionar y acumular. Regularmente se requiere separar de los procesos de reciclaje los diferentes tipos de polímeros o en particular el plástico deseado. Los procedimientos de separación y/o clasificación se dividen en macro clasificación, micro clasificación y clasificación molecular.

La figura 13 representa la cantidad de PET a reciclar, así como su manejo en escala industrial.



Figura 13. Manejo del PET en escala industrial.¹⁶



Macro clasificación: En este proceso se incluye la separación de botellas de PET con la de otros materiales, gran parte de esta separación se hace manualmente, el objetivo de este proceso es hacerlo más económico y confiable, este proceso va cada vez más en aumento.

Micro clasificación: Este proceso consiste en someter los artículos a un proceso de reducción de tamaño, como el astillado o la molienda. Los fragmentos deben de separarse de acuerdo al tipo de resina y quizás también por color.

Clasificación Molecular: Este proceso es aquel en el que se recolecta el material que está completamente roto.

2.3 TIPOS DE RECICLADO

Reciclaje Físico: En este tipo de reciclado se cambia la apariencia del material, pero no su estructura química fundamental, por lo menos no en un grado elevado, comprende el cambio de tamaño y forma de los materiales mediante el remolido, así como la clasificación mediante corrientes de aire para eliminar contaminantes ligeros, el lavado, un sistema basado en la gravedad para separar componentes más pesados que el agua de aquellos que no lo son, el tamizado, el enjuagado y con frecuencia la fusión y la formación de gránulos gruesos¹⁹. Se debe de tomar en cuenta que este tipo de reciclaje es ocupado como punto de partida para otros tipos de reciclaje, lo cuales se mencionan más adelante.

Reciclaje Mecánico: Consiste en la selección de botellas, lavado y molienda, obteniéndose un tipo de escamas, las cuales se pueden utilizar tal cual, sin transformarlas a pellets, y son utilizadas para productos que se obtienen mediante extrusión o inyección (Ver Figura 14).

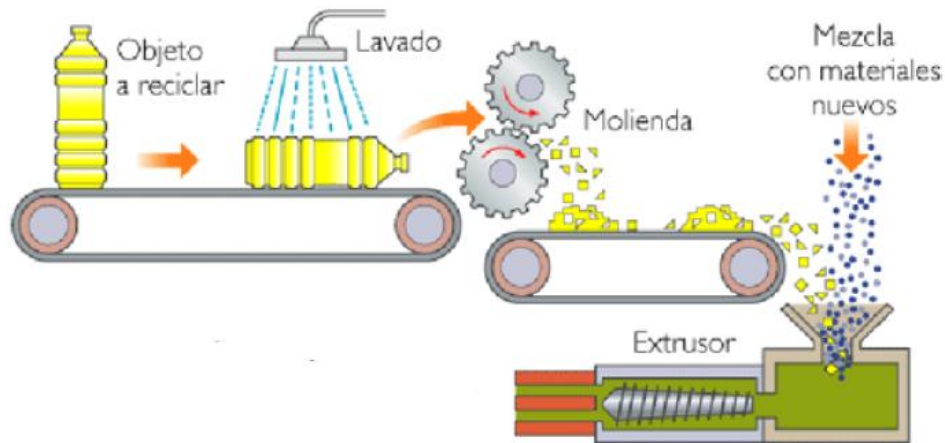


Figura 14 Reciclaje mecánico²¹

Este proceso de recuperación se puede dividir en dos etapas, la primera procede de la identificación y clasificación del material, en donde se involucra el lavado, la separación de etiquetas, el triturado y el lavado final. Una segunda etapa cuando ya se tienen las escamas con gran pureza, se seca, se incrementa la viscosidad y se cristaliza, quedando apta para su transformación.

El producto obtenido presenta propiedades inferiores a las del PET virgen, por lo cual la posibilidad de ser utilizado en productos que estén en contacto con alimentos no es recomendable por el grado de contaminación que puede llegar a presentar¹⁷.

Reciclaje Químico: consiste en la ruptura de la estructura molecular por medio de reacciones químicas, es decir, la separación de los componentes básicos de la resina, de la cual los productos deben purificarse y tomar en cuenta que se va a producir; es decir, si se obtuvo el mismo polímero o uno similar; esto tiene el propósito de poder reducir el consumo de gas y petróleo, las cuales son materias primas principales para la obtención del PET.



Un tipo de reciclaje consiste en la despolimerización del material mediante distintos agentes químicos, se rompen las cadenas poliméricas para volver a obtener los monómeros de partida. Los productos obtenidos de elevada pureza se vuelven a polimerizar para fabricar nuevo PET básicamente como el PET virgen, por lo que este tipo de materiales pueden ser utilizados para contacto con alimentos, lo cual dependerá del grado de pureza que presenten los monómeros obtenidos.

Cabe mencionar que antes de cada reciclado químico le antecede un reciclado mecánico, ya que en este paso se obtienen las escamas, cuyas dimensiones pueden variar de entre 2 y 10 mm. Ya que el tamaño de partícula depende del área de contacto, una granulometría más fina representa una disminución en el tiempo de proceso, ocurriendo un incremento en la velocidad de reacción.

En la industria hay diferentes tipos de procesos de despolimerización de PET, siendo los más importantes la Metanólisis, la Glicólisis, la Hidrólisis (alcalina, acida, neutra), la Aminólisis, la Pirólisis y la Gasificación.

Dentro de todos estos métodos los más utilizados son la glicólisis, metanólisis e hidrólisis, sin embargo la metanolisis e hidrólisis se llevan a cabo a condiciones de presión y temperatura muy elevadas, en el caso de la hidrólisis por las condiciones acidas y básicas a las cuales se trabaja, provoca mayores problemas ambientales, así entonces, la glicolisis es el método mayormente utilizado en la despolimerización del PET¹⁷.

METANOLISIS. Este método se lleva a cabo por medio de un tratamiento del polímero en altas cantidades de metanol, en presencia de un catalizador como el trisopropóxido de aluminio o el acetato de zinc y sales de ácido arilsulfúrico, este proceso se lleva a condiciones de presión y temperaturas altas de entre 20-25 Kg/cm³ y 180-280⁰C, por un tiempo de 3 a 4 horas.

En la síntesis el PET se descompone en sus moléculas básicas, dimetil tereftalato y Etilenglicol, las cuales pueden ser nuevamente polimerizadas para la obtención del polímero²³.

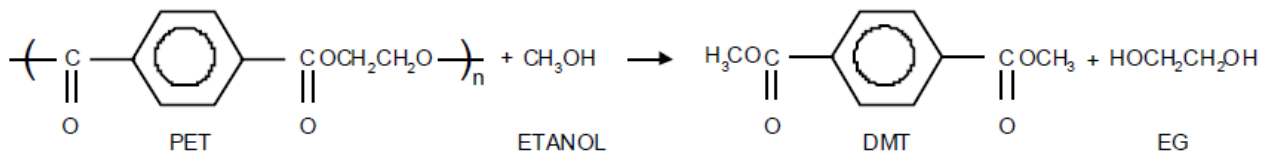


Figura 15: Reacción de Metanolisis²³.

Este proceso incluye un alto número de operaciones unitarias, como la filtración (centrifuga), cristalización multi-etapa y destilación al vacío. Estas operaciones son llevadas a cabo para la purificación, removiendo impurezas físicas, y se obtiene como resultado un producto de alta pureza. La figura 16 representa la despolimerización por metanolisis¹⁷.

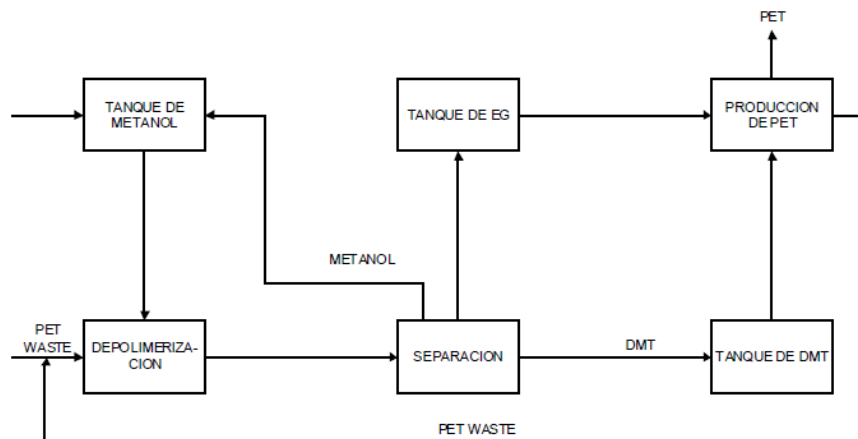


Figura 16: Diagrama de bloques la despolimerización por Metanolisis²³.



El catalizador debe de ser desactivado después de terminar la reacción, ya que en etapas posteriores se puede perder el Dimetil Tereftalato (DMT) por transesterificación con Etilenglicol. Las características de la Metanolisis para poder ser utilizado como método de reciclaje son:

- Debido a la fácil purificación del DMT utiliza una alimentación menor.
- Es más costosa, el beneficio es que produce menos contaminación.
- El costo de DMT recuperado es mayor al del DMT virgen.

HIDRÓLISIS: La hidrólisis se refiere a una reacción ácido-base entre una sustancia, típicamente una sal y el agua, usado a elevadas temperaturas y presiones para obtener Acido Tereftalico puro (AT) y EG para su reutilización en la producción de polímeros virgen, este método no es muy usado a diferencia de otros ya que los costos de purificación del AT son muy elevados.²³

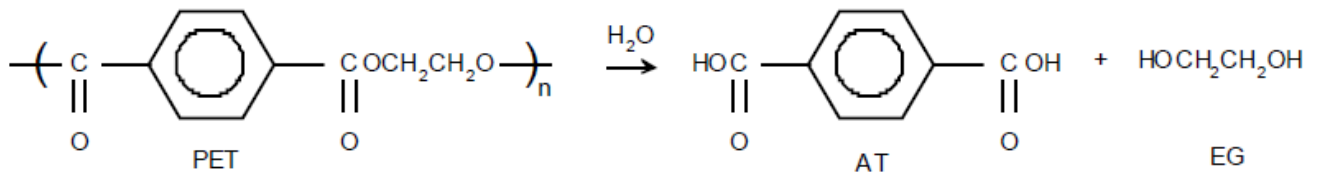


Figura 17: Reacción de Hidrolisis²³.

Este proceso es clasificado en tres categorías, hidrólisis neutra, hidrólisis alcalina o saponificación e hidrólisis acida.

HIDRÓLISIS ACIDA: En la hidrólisis ácida del PET se utiliza un ácido inorgánico fuerte, usualmente el ácido nítrico, ácido fosfórico o el ácido sulfúrico con un pH de 2 a 6. El ácido más usado para el proceso es el sulfúrico, donde se recomienda que tenga una concentración no menor de 87 % en peso, ésta concentración es muy importante para la degradación del PET, en donde podemos usar condiciones de presiones y temperaturas normales por debajo de los 100⁰C de entre los 85-95⁰C con un tiempo de reacción menor a 30 minutos, si se llegara a utilizar ácidos diluidos entre el 67% en peso se necesitarían temperaturas más altas cerca de los 150⁰C y altas presiones¹⁷.

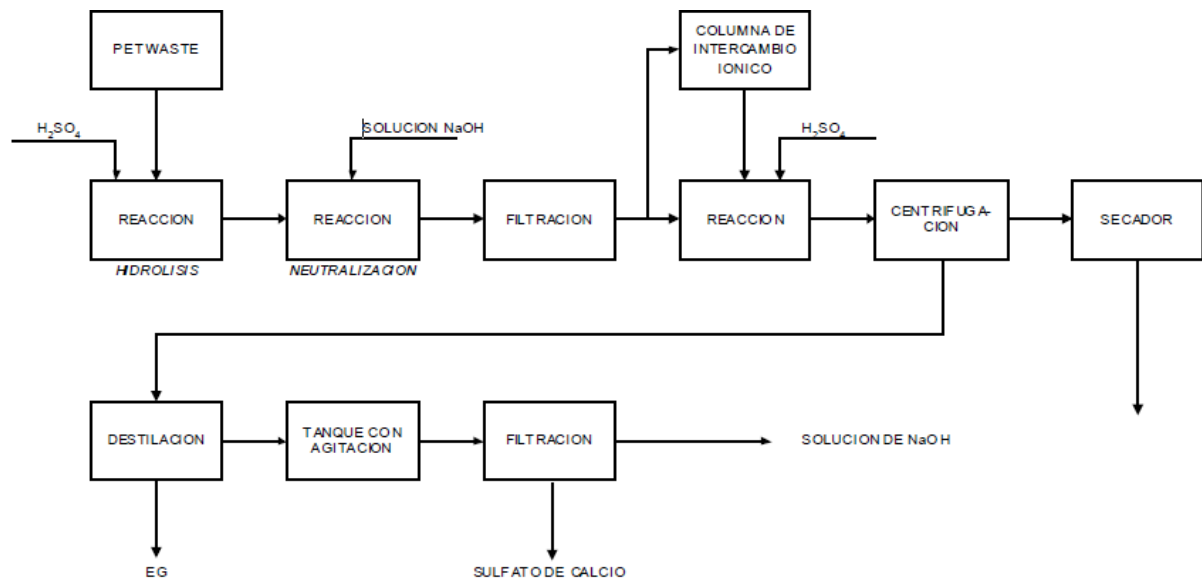


Figura 18 Diagrama de bloques de la despolimerización por hidrólisis ácida²³.



Uno de los principales problemas que nos causa este método con ácido sulfúrico concentrado es la alta corrosión a los equipos y la generación de altas cantidades de residuos sólidos inorgánicos y acuosos. Esta técnica a nivel laboratorio es recomendable usarla pero a nivel industrial involucra una gran cantidad de costos, sobre todo en la parte de purificación ya que demanda muchas materias primas las cuales aumentan el costo significativamente en la producción.

HIDRÓLISIS ALCALINA: La hidrólisis alcalina se lleva a cabo con el uso de soluciones de hidróxido de sodio, hidróxido de potasio o una solución acuosa de amoníaco, la solución acuosa más utilizada o recomendada es la de hidróxido de sodio el cual se utiliza con una concentración del 4 al 20%, con un parámetro de temperaturas entre 180 y 250⁰C con presiones de 1.4 a 2 MPa, con un tiempo de 3 a 6 horas de acuerdo a las condiciones y cantidades de reactivos utilizados.²³

El PET se introduce a un reactor y se hidroliza con la solución de NaOH en presencia de bromuro de tributilhexadecil fosfonio (QBr) utilizado como catalizador en atmosfera inerte de nitrógeno y agitación constante, dando como resultado el tereftalato disodico (NaTPA) y EG.

HIDRÓLISIS NEUTRA: Esta se lleva a cabo con agua o vapor a altas presiones de 1 a 4 MPa y temperaturas de entre los 200 y 300⁰C, aunque este proceso preside de catalizadores el pH de la mezcla alcanza valores de entre los 3.5 y 4, pero esto no significa que no se pueden usar, se recomiendan los acetatos de metales alcalinos, como acetatos de cobre, manganeso y zinc, el más acertado hasta el momento es el acetato de zinc, la reacción se lleva a cabo en un rango de temperaturas de 250-265⁰C los cuales provocan una aumento hasta del 20% comparado con las reacciones no catalíticas.

El producto principal de este proceso es el Ácido Tereftálico puro (AT), aunque como subproducto se obtiene un monoéster de glicol, estos se disuelven bien a



temperaturas de 95-100⁰C donde el AT es casi insoluble y no hay problema al separar la mezcla.

Los usos que se le pueden dar a estos productos por la pureza obtenida, es en la producción de homo y copolímeros. Este tipo de hidrólisis presenta ciertas ventajas sobre las hidrolisis ácidas y alcalinas como las que se presentan a continuación:

- No se forman cantidades sustanciales de sales inorgánicas, las cuales son difíciles de disponer
- No presenta problemas de corrosión, ya que no se utilizan ácidos o bases fuertes
- Es un proceso amigable ambientalmente por lo que se espera un gran interés en esta tecnología²³.

La principal desventaja que presenta es la purificación del AT, las impurezas quedan incrustadas en esta materia prima, necesitando sistemas de purificación más sofisticados.

GLICOLISIS: La glicólisis es una reacción de condensación inversa, la cual utiliza EG en exceso, provocando degradación, obteniendo oligómeros de cadena corta y el bis-hidroxi Etilen Tereftalato (BHET), ambos son materias primas con mucho valor en la preparación de resinas insaturadas de poliéster, poliuretanos (especialmente espumas rígidas) y PBT.

Para lograr la degradación, el PET se prepara calentando con un glicol, (etilenglicol, di-etilenglicol, propilenglicol, di-propilenglicol y 1,4 butadienol), la despolimerización se lleva a cabo comúnmente con EG, donde uno de los productos obtenidos es el BHET. El BHET es un sólido ceroso con punto de fusión relativamente alto, esta materia prima es difícil de purificar por destilación, pero puede ser llevada a cabo por filtración bajo presión para remover las impurezas



METODO 1

Esta reacción es catalizada por acetatos de Zn, Mn, Co, Pb, en presencia de carbonato de sodio y sulfato de potasio, se utilizan presiones normales o altas, y temperaturas de entre 80-250⁰C, usualmente se lleva un tiempo de entre 3 a 8 horas, esto va a depender de la cantidad de reactivos utilizados y las condiciones de temperatura y presión, las proporciones por peso de EG/PET varían de 2:1 hasta 4:1, se puede llegar a utilizar una purga continua de nitrógeno para inhibir la degradación de los polioles resultantes.

Cabe mencionar que las materias primas obtenidas en el proceso no sirven para volver a polimerizar el PET, sino se produce una mezcla de oligómeros, los cuales presentan un beneficio económico para la fabricación de poliésteres insaturados, estos poliésteres son líquidos viscosos, que pueden entrecruzar sus cadenas con la adición de un monómero vinílico, y obtener un producto sólido termoestable¹⁷.

METODO 2

En este método no tiene muchas variantes al método anterior, sólo se modifican algunos parámetros de temperatura y tiempos de reacción, este método prescinde del carbonato de sodio y el sulfato de potasio. Después de pasar por el reciclado mecánico, y teniéndose las escamas, estas últimas son puestas con EG y acetato de Zinc como catalizador, a temperaturas de entre 195 y 220⁰C, a presiones normales. Se utiliza una proporción de EG:PET de 6:1 y una relación de catalizador/PET de 1% con un tiempo de 3 horas.

Se realiza una extracción con agua y posteriormente se realiza una filtración para eliminar impurezas y PET que no reaccionó, lo rescatado en la filtración se pone en un cristizador, y un posterior filtrado para poder obtener en BHET sólido, el EG obtenido se puede recuperar por destilación al vacío. La Figura 20 representa la glicólisis del PET¹⁷.

Glicólisis de PET

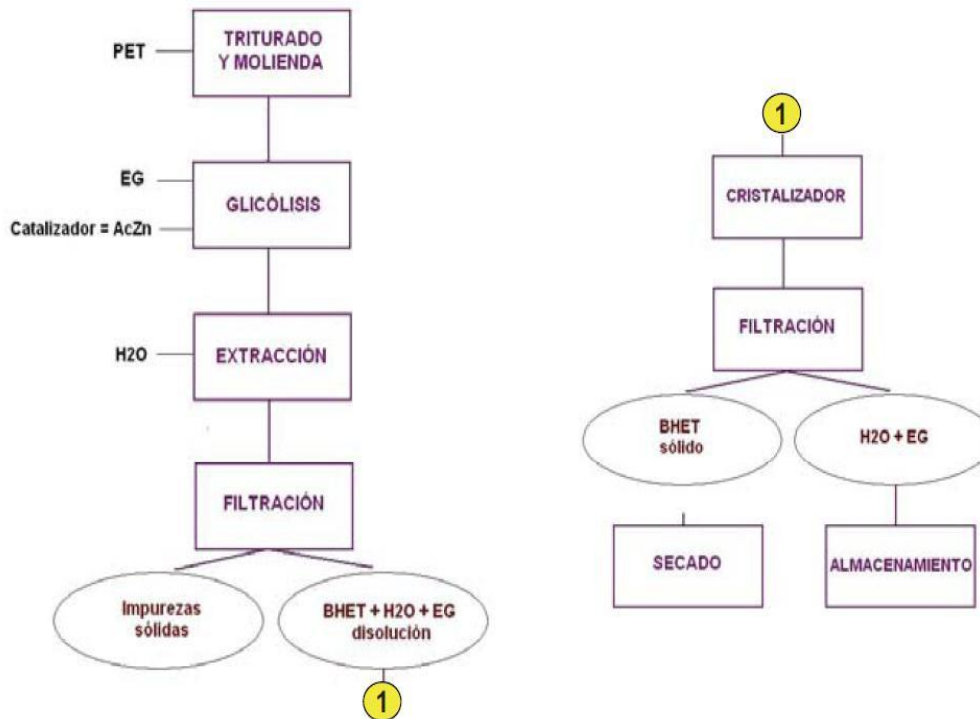


Figura 20: Diagrama de bloques del método de Glicólisis¹⁸.

Para mejorar la economía del proceso se recomienda reutilizar el EG, según datos experimentales el rendimiento de BHET con EG reciclado es del 81%

AMINOLISIS: Esta reacción se lleva a cabo con PET para la formación de diamidas de AT y EG, el proceso es llevado a cabo en una solución acuosa de aminas primarias como la metil-amina o etilamina a temperaturas de 20 hasta 100°C, para garantizar que el área de contacto se incremente se recomienda que el PET este en forma de polvo o en escamas, lo cual ayuda a que la despolimerización se lleve más rápido, los productos obtenidos, pueden ser utilizadas como compuestos intermedios o monómeros para la producción de



poliésteres de amidas o poli ureas por medio de algunas reacciones subsecuentes con isocianatos¹⁷.

PIROLISIS: Es el craqueo de las moléculas de PET por calentamiento en el vacío. Este tipo de procesos genera hidrocarburos líquidos y sólidos que pueden ser luego procesados para la obtención de combustibles sintéticos, por ejemplo para motores de ciclo diesel. Es utilizado en plásticos como Polietileno y Polipropileno, debido a que sólo contienen carbono e hidrógeno en su cadena.

Con este método también podemos obtener carbón activado a partir del PET mediante una pirolisis extrema, utilizando también en la purificación del agua.

GASIFICACION: Este proceso utiliza mezclas de plásticos los cuales son calentados con aire o con oxígeno, los productos obtenidos son monóxido de carbono e hidrógeno, los cuales pueden ser utilizados para la producción de metanol o amoniaco.

La ventaja de este método es que no necesita un reciclado mecánico previo, ya que acepta como alimentación toda la corriente de residuos. En el proceso, los residuos, se pirolizan a 600⁰C y se alimentan al gasificador a 2000⁰C, el gas de síntesis obtenido, una vez limpio, se quema en una turbina de gas para producir 300 Kw de electricidad. En este tipo de reciclado podemos hablar del reciclado energético, el cual como ya se mencionó se usa un incinerador para los plásticos, obteniéndose energía calórica²¹.

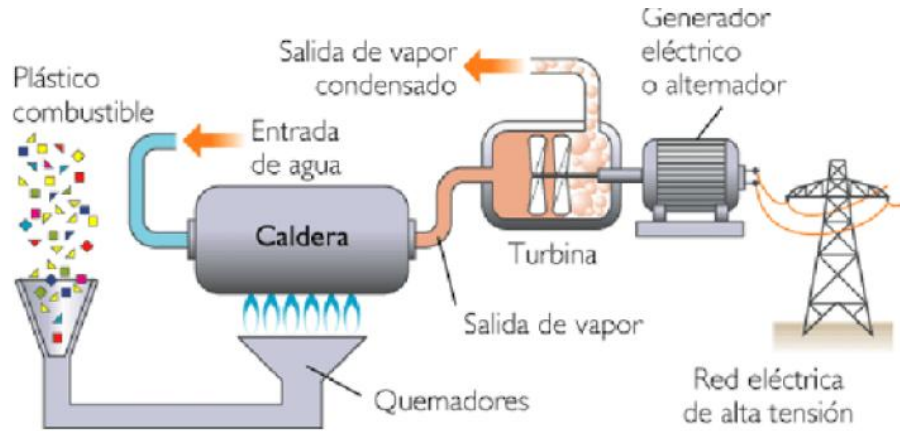


Figura 21. Representación de la despolimerización por gasificación²¹.

El PET tiene un poder calórico de 23 MJ/Kg, el cual es muy similar al carbón, debido a que su composición es de Carbono, Hidrógeno y Oxígeno su combustión es limpia, pudiendo ser utilizada para la producción de energía.

2.4 USOS DEL PET RECICLADO

Debido a que algunas leyes como la FDA no permite el uso de materiales reciclados para contacto con los alimentos, fue necesaria la búsqueda de nuevas aplicaciones, y se llegó a observar a que es factible utilizarlo como fibra, o como tejidos de poliéster para camisetas y sabanas, autopartes, láminas, películas y correas industriales, bolsas para dormir, almohadas, hilos a base de poliéster en chaquetas para esquís, tapetes, entre otros muchos.

Environment and Plastics Industry Council (EPIC) fabricó vestidos de novia hechos de plástico reciclado, el cual cada vestido requirió aproximadamente de 80 botellas suaves de refresco¹⁹. Se pueden fabricar botellas con un 25% de PET re polimerizado, aunque esto se dejó de realizar debido al alto costo que implicaba.

Si el PET reciclado se utiliza para la obtención de envases de formado en caliente, es posible reutilizarlo como empaques de huevo, para productos frescos o para galletas, siendo los empaques de huevo la primer aplicación de este material que entró en contacto con alimentos. En cambio, si se va a manipular para productos



no alimenticios, es posible utilizar hasta el 100% de resina Poliéster reciclada, o mezclarla con porcentaje muy pequeño de resina virgen. Si combinamos resina virgen con resina reciclada resulta mucho más barato que hacer sistemas de multicapas. La Figura 22 presenta algunos de los usos del PET reciclado.



Figura 22. Principales usos del PET reciclado¹.



CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para nuestra síntesis se utilizó PET grado botella Post-Consumo (precursor), seleccionando solo las utilizadas para agua ya que en éstas el polímero es más limpio, por la cantidad de aditivos contenida durante su formulación y transformación, dichas botellas se sometieron a un acondicionamiento previo, el acondicionamiento incluye el lavado con detergente y secado con aire, posteriormente se obtienen tiras delgadas del material, ya que a mayor superficie de contacto mejor reacción (ver Figura 23). El catalizador utilizado para que se pueda ejercer la reacción fue acetato de zinc y se usó como solvente Etilenglicol.



Figura 23: Botella de PET post-consumo cortadas en tiras



Se realizaron 3 experimentos con proporciones distintas de reactivos (relaciones 4:1, 6:1 y 8:1 de Etilenglicol : PET), con la finalidad de conocer cual relación presenta el mayor rendimiento molar de acuerdo al peso molecular del BHET obtenido como producto y el PET utilizado como reactivo precursor, por lo cual se necesitaron las siguientes cantidades de catalizador y reactivos:

1. Se toma en cuenta una proporción para el catalizador en una relación de:

$$1.5 : 100$$

Acetato de Zinc (AZ.) : PET

2. Se pesaron los reactivos de acuerdo a la proporción utilizada de Etilenglicol respecto al PET (*Etilen Glicol (EG):PET*) para cada experimento como se indica en la tabla 5.

Tabla 5 Proporciones Etilenglicol : PET

Proporción	4:1	6:1	8:1
PET (g)	2	2	2
V_{EG} (ml.)	7.2	10.8	14.4
Acetato de Zinc (g)	0.03	0.03	0.03

3. Los reactivos fueron colocados en tubos de reacción Schlenk con capacidad de 50 ml, una de las bocas de los tubos fue tapado con tapones de corcho horadados para introducir un Termómetro de mercurio el cual registra temperaturas desde -10 a 260° C (Ver Figura 24).
4. Los tubos Schlenk fueron calentados en baño de vaselina líquida por un tiempo de 3 horas, el baño de vaselina líquida se eligió debido a que con éste se logró alcanzar el rango de temperatura deseado que es de 180° a 210°C (Ver Observaciones pág. 47).

5. Cumplidas las 3 horas de reacción, se dejó enfriar hasta temperatura ambiente (ver Figura 24), para posteriormente, agregar agua destilada en exceso a una temperatura de 94°C (ver Figura 25), este paso se realiza para eliminar las impurezas y disolver el Etilenglicol remanente.

En este paso se observó que la muestra de la relación 4:1 tenía un enfriamiento más rápido, ya que, era la primera en ponerse cerosa debido a que tenía menor volumen de Etilenglicol, y después la de relación 6:1 y por último la 8:1.

Por otro lado, cuando se le agregaba el agua hirviendo a las tres proporciones, se ponían de nuevo en fase líquida, aunque se formaba casi de manera instantánea un precipitado blanco ceroso.



Figura 24: Enfriamiento de la reacción a temperatura ambiente



Figura 25: Agregado de agua destilada en exceso

- Después de agregar el agua destilada en exceso se agitó vigorosamente para homogenizarlo, y en seguida se filtró todo lo que contenía el tubo de reacción (ver Figura 26).



Figura 26: Primera Filtración.

- En primera reacción al ser filtrada se podía observar que su paso por el filtro era muy rápido y no presentaba dificultades, en el papel filtro se quedaba una torta muy fina del precipitado, por otro lado, el líquido se tornaba de un color blanco turbio (la torta obtenida era desechada, ya que solo eran las impurezas y la materia prima sin reaccionar).
- El líquido obtenido después del filtrado, se colocó a enfriamiento en un refrigerador durante 4 horas a 4°C. Después de estar el tiempo necesario



en el refrigerador, el líquido blanco turbio, se solidificó observándose la formación de cristales transparentes.



Figura 27: Muestra a 4°C

9. Posteriormente se realizó una segunda filtración, la torta obtenida se puso a secar a 60°C durante 72 horas, la figura 28 muestra el residuo contenido en el papel filtro, en donde se pueden observar unos ligeros brillos, corroborando formación de pequeños cristales de BHET.



Figura 28: Torta seca después de 72 horas a 60°C (cristales de BHET).



Observaciones realizadas durante el experimento:

Al inicio de los experimentos, se tuvo un poco de dificultades para poder encontrar el medio de calentamiento ideal, ya que no se llegaba a la temperatura requerida, debido a por ejemplo, algunas variaciones en el clima ya que cuando se tornaba más frío contribuía a que no se llegara a la temperatura requerida tan fácilmente, se ensayó con varios medios de calentamiento, se inició con un baño de arena (usada para construcción), pero solo se alcanzaba 180°C, esto hacía que el tiempo de reacción se prolongara hasta 24 horas, ya que no se disolvía por completo el PET.

Posteriormente se probó con un baño de aceite de soya, pero se alcanzaba sólo 180°C y el tiempo de reacción se alargaba. El criterio para escoger el mejor medio de calentamiento fue el punto de ebullición de cada sustancia utilizada para éste fin, y a la vez si las condiciones con las que se contaba en el laboratorio eran las óptimas para poder llegar a la temperatura deseada, finalmente se recurrió al baño de vaselina líquida, con la cual se obtuvieron temperaturas en un rango de 190-210°C, lo cual nos redujo el tiempo de reacción a 3 horas.

Otro punto importante es que las condiciones de reacción fueron a presión atmosférica y sin agitación. La mayoría de este tipo de experimentos ha sido realizado por otros autores en condiciones de vacío y con agitación rigurosa.

A lo largo de los experimentos que fueron realizados, se corrigieron algunos errores en la misma, ya que se necesita que los tubos no estuvieran totalmente tapados, es decir que se les dejó libre una de las boquillas, en este caso la que se localiza a un lado, no la principal, esto con el objeto de que no se generaba tanta presión dentro del tubo ya que empujaba el tapón y salía proyectada parte de la muestra, y esto impedía seguir con la experimentación.

Por otro lado, se pudo observar en los experimentos que el producto es afectado de manera directa, cuando la temperatura de cristalización no sea la adecuada, ya



que si está por debajo de 4°C , los cristales son muy pequeños y logran pasar por los poros del papel filtro, y si está por arriba de esta temperatura no se alcanzan a formar los cristales. Es de considerar igualmente determinante que la temperatura del exterior, es decir la ambiental, nos afectó directamente desde el calentamiento inicial, ya que entre más frío se encontraba el clima, más se tardaba en llegar a la temperatura requerida.

RESULTADOS:

Para la caracterización de los materiales utilizados y resultados obtenidos se recurrió a los análisis de un Espectrofotómetro de Infrarrojo (IR) de la marca PerkinElmer, modelo Spectrum Two (FT-IR Spectrometer), el cual cuenta con un Analizador Universal tipo ATR, (Attenuated Total Reflection). El equipo cuenta con un rango de longitud de onda de $8,300$ a 350 cm^{-1} , con divisor de haz de KBr y un onterferómetro rotatorio de Michelson.

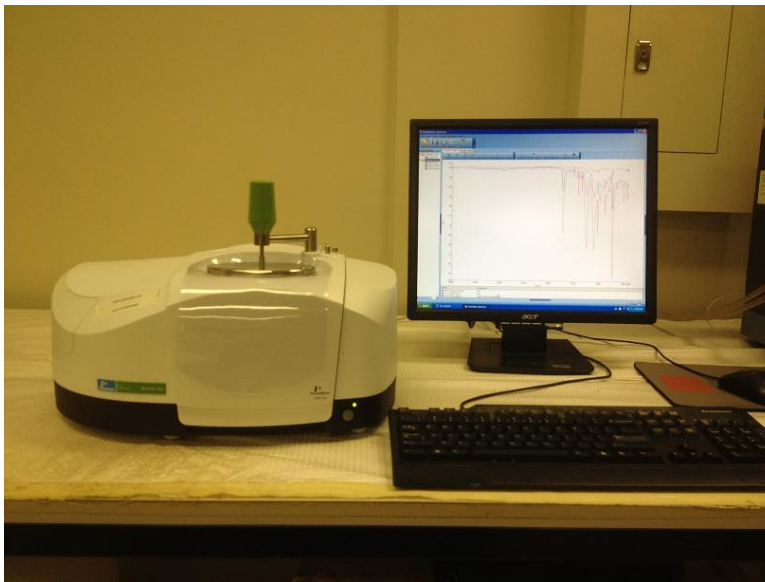


Figura 29: Espectrofotómetro de Infrarrojo Spectrum Two
Fuente: http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-131248BRO_SpectrumTwo.pdf Recuperado: 31 mayo de 2013

En el ATR se emplea una técnica de muestreo utilizada en el IR, la cual se produce cuando una radiación infrarroja entra en un cristal transmisor ATR y de alto índice de refracción.



Figura 30: ATR del equipo de infrarrojo Spectrum Two
Fuente: http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-131248BRO_SpectrumTwo.pdf Recuperado: 31 mayo de 2013

El ATR tiene la capacidad de medir una amplia variedad de muestras sólidas y líquidas sin necesidad de preparaciones complejas. El cristal de ATR comprende un material transparente con un alto índice de refracción y superficies pulidas. El cristal está diseñado para permitir una reflexión interna total que crea una onda delgada sobre la superficie del cristal. Esta onda se extiende a la muestra que se mantiene en contacto íntimo con el cristal, registrándose el espectro de infrarrojo de la muestra analizada (ver figura 31).

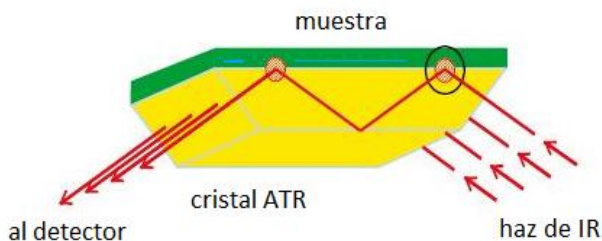


Figura 31: Efecto del cristal ATR sobre la muestra
Fuente: http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-131248BRO_SpectrumTwo.pdf Recuperado: 31 mayo de 2013

La espectroscopia Infrarroja tiene la capacidad de identificar las diversas clases de grupos funcionales contenidas en un compuesto. Los enlaces de cada grupo

funcional vibran con movimientos de estiramiento y flexión, tomando en cuenta que la vibración es característica de cada compuesto (ver figura 32).



Figura32: Modos de vibración de los enlaces moleculares en infrarrojo
Fuente: <http://www.slideshare.net/cajarampa/espectroscopia-infrarroja> 31 MAYO 2013

Se produce una banda de absorción cuando una molécula absorbe energía al ser bombardeada con radiación de una frecuencia que coincide exactamente con la frecuencia de una de sus vibraciones. Se obtiene un espectro infrarrojo cuando se hace pasar radiación infrarroja a través de una muestra, y se obtiene una gráfica del porcentaje de la transmitancia de la radiación, en función de la longitud de onda de la radiación transmitida. Éste se puede dividir en dos regiones, a la primera se le llama *región de los grupos funcionales*, la cual corresponde a los dos tercios del lado izquierdo del espectro (de 4000 a 1400 cm^{-1}), que es nombrado así, ya que en esta región se encuentran más grupos funcionales con bandas de absorción; y la segunda región es llamada *región dactiloscópica*, la cual corresponde a la tercera parte de la derecha (de 1400 a 600 cm^{-1}), y es nombrada así ya que es característica de cada compuesto así como la huella digital es característica de cada persona²⁴ como se muestra en la figura 33.

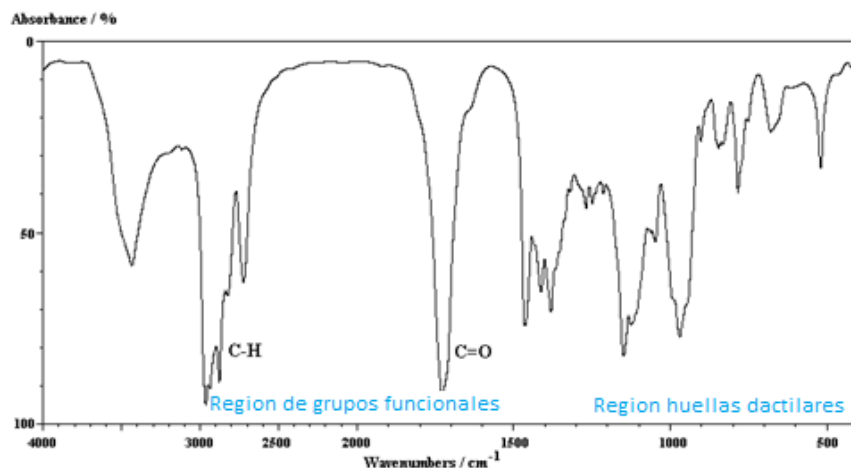


Figura 33: Regiones típicas del espectro de infrarrojo

Fuente: <http://www.slideshare.net/cajarampa/espectroscopia-infrarroja> Recuperado 31 mayo 2013

Como se menciona, el espectro IR tiene distintas regiones. La parte izquierda del espectro muestra las tensiones C-N, O-H y N-H, los enlaces triples absorben alrededor de 2200 cm⁻¹ seguidos por los enlaces dobles hacia la derecha alrededor de 1700 cm⁻¹. La región por debajo de 1400 cm⁻¹ se denomina región de huella dactilar. En la siguiente figura se presenta las principales regiones características de los materiales

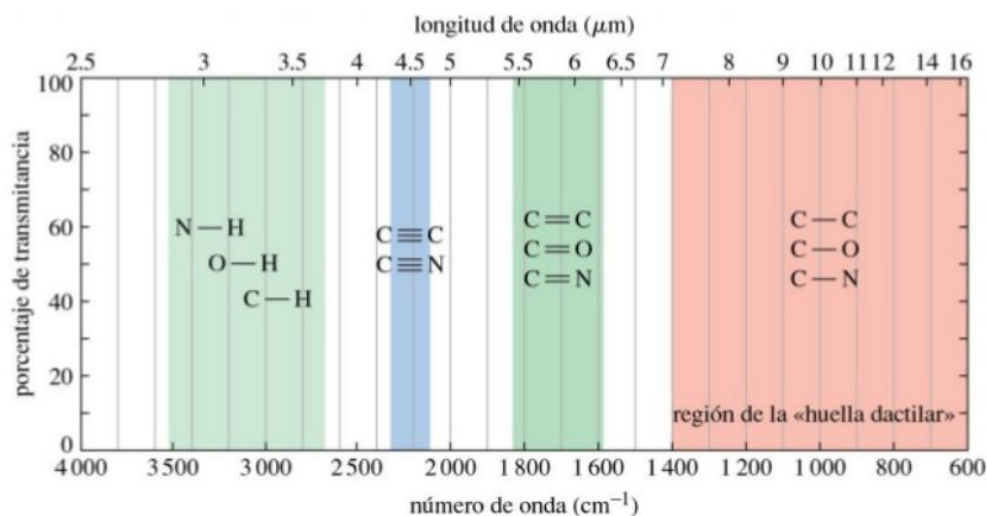


Figura 34: Resumen de las frecuencias de tensión en el Infrarrojo

Recuperado de http://organica1.org/teoria1411/12_files/frame.htm 31 de mayo de 2013



Para nuestro caso se utilizó un Espectrofotómetro con transformada de Fourier, el cual tiene una sensibilidad superior que los convencionales, y esto hace que mida todas las frecuencias en forma simultánea.

Lo que ayuda a la identificación de compuestos por este método es esencialmente lo posición, intensidad y forma de banda de absorción, así como en qué región se encuentre. Tomando en cuenta que la frecuencia de la banda de absorción depende del tipo de enlace, de la hibridación de los átomos, de la donación y atracción de electrones, etc.

En el experimento se tienen que caracterizar inicialmente las materias primas utilizadas para la Glicolisis, las cuales fueron:

- ✓ Etilenglicol
- ✓ PET de botella de agua
- ✓ Acetato de Zinc

Estas materias primas son de grado analítico y las botellas de PET se utilizaron sin previa purificación.

Se tomaron pequeñas muestras de cada materia prima y fueron colocadas para su caracterización sobre el ATR del espectrofotómetro, antes de este paso fue escaneado el fondo para descartar lecturas del ambiente.

A continuación se presentan los espectros de IR. Se muestran los espectros IR de longitud de onda contra transmitancia, en donde se observa el espectro típico del etilenglicol en la Figura 35, de la botella de PET en la figura 36, y del acetato de zinc en la Figura 37.

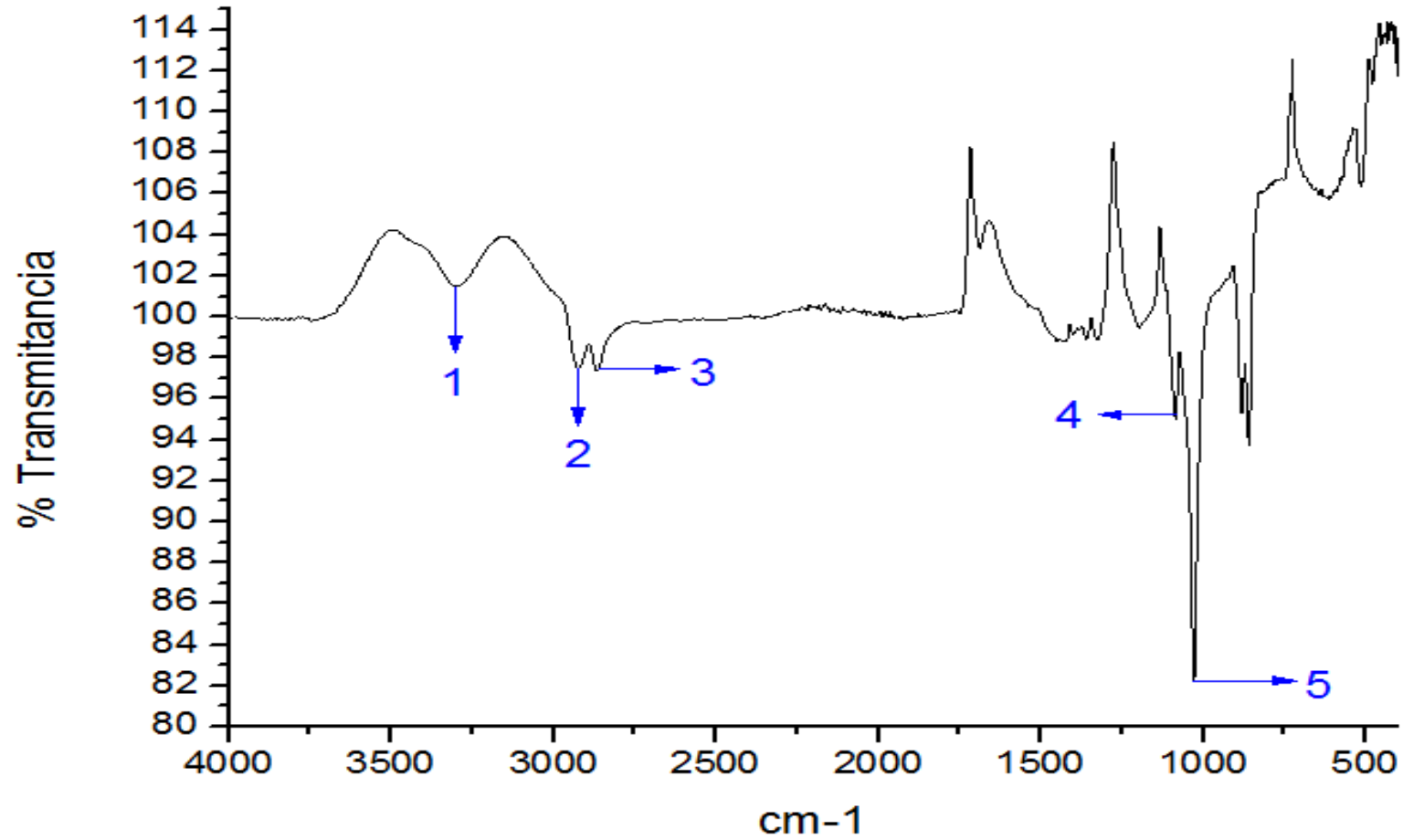


Figura 35:Espectro IR del Etilenglicol

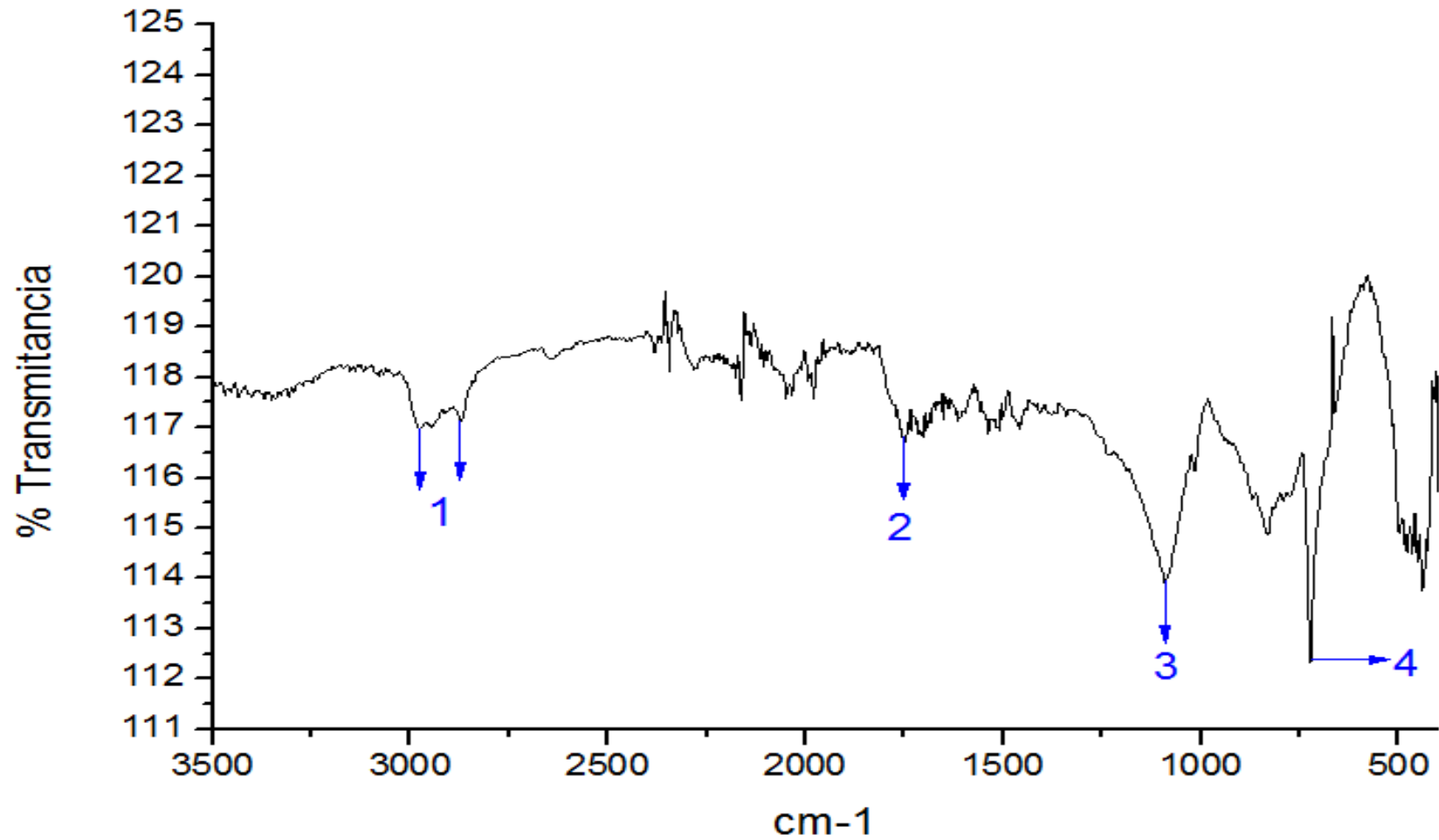


Figura 36: Espectro IR de la botella PET de agua.

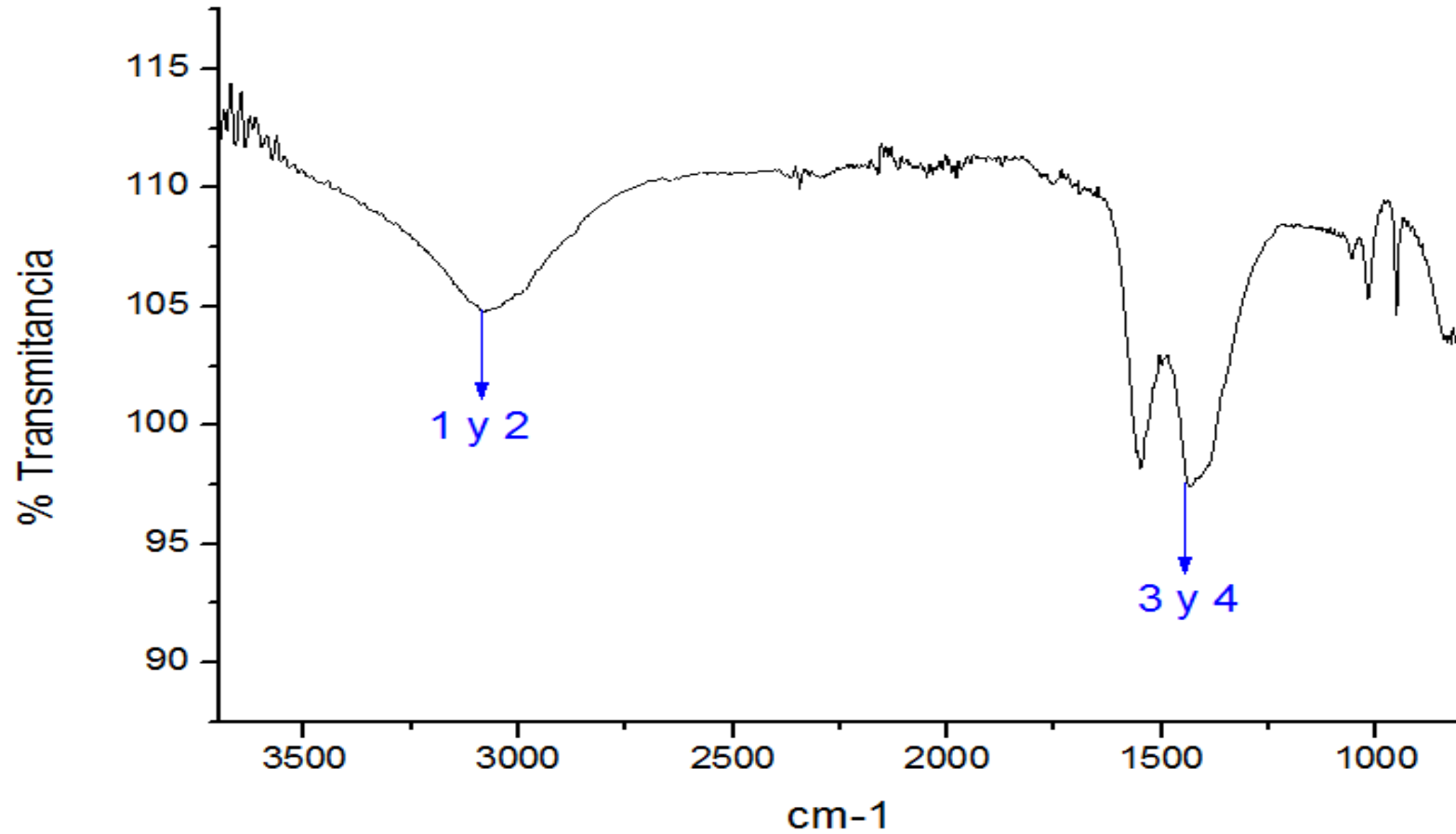


Figura 37: Espectro IR del Acetato de Zinc



Para los espectros anteriores se tienen las siguientes tablas, con las cuales se puede realizar su interpretación, en la Tabla 6 se presentan las posiciones del alcohol, de un CH₂ asimétrico, CH y se presentan enlaces C-OH:

Tabla 6: Interpretación del espectro del Etilenglicol

Etilen Glicol		
Posición (cm ⁻¹)	Grupo:	
3650-3200	OH- de estiramiento del Alcohol	1
-2925	Estiramiento Asimétrico de CH ₂	2
2850-3000	Uniones CH de compuestos saturados	3
1300-1000	C-O de Alcoholes, éteres y esterres	4
1075-1025	Estiramiento del enlace C-OH del alcohol	5

La tabla 7 presenta las posiciones de la cadena alquílica de Etilen-éster, del grupo carbonilo, enlace C-O y uno de un anillo aromático, siendo las posiciones características del Polietilen Tereftalato (PET).



Tabla 7: Interpretación del espectro del PET

PET de botella de agua		
Posición (cm ⁻¹)	Grupo:	
2962-2877	Cadena Alquílica del grupo Etilen éster	1
1750-1715	Estiramiento Carbonilo C=O	2
1300-1000	C-O de Alcoholes, éteres y ésteres	3
- 725	C-H del anillo Aromático	4

La Tabla 8 presenta las posiciones de grupos carboxílicos, lo que es representativo al grupo acetato.

Tabla 8: Interpretación del espectro del Acetato de Zinc

Acetato de Zinc		
Posición (cm ⁻¹)	Grupo:	
3500-2500	Estiramiento de O-H de ácidos Carboxílicos	1
3000-2500	O-H de ácidos	2
1440-1200	Torsión/Estiramiento de carboxilo	3
1420-1200	Torsión/Estiramiento de carboxilo	4

De acuerdo con lo anterior, se puede observar que el catalizador (Acetato de Zinc) va a tender a colaborar con el rompimiento de la cadena polimérica, ya que en la reacción de glicólisis se presenta deficiencia de carga en el carbono del grupo carbonilo presente en el PET, lo que lo hace susceptible a un ataque nucleofílico por un grupo hidroxilo del Etilenglicol.



En lo que respecta a la polimerización del PET se obtuvieron los siguientes espectros. En la figura 32 se presenta el espectro de los residuos de los cristales obtenidos en una relación Etilen glicol : PET de 4:1, en donde se puede apreciar un cambio drástico en las posiciones de los picos del espectro comparándolas con los espectros de las materias primas, lo que demuestra que se presentó la reacción, aunque en las figuras 39 (relación 6:1) y 40 (relación 8:1) se presentan con mayor intensidad los picos 3, 4 y 5.

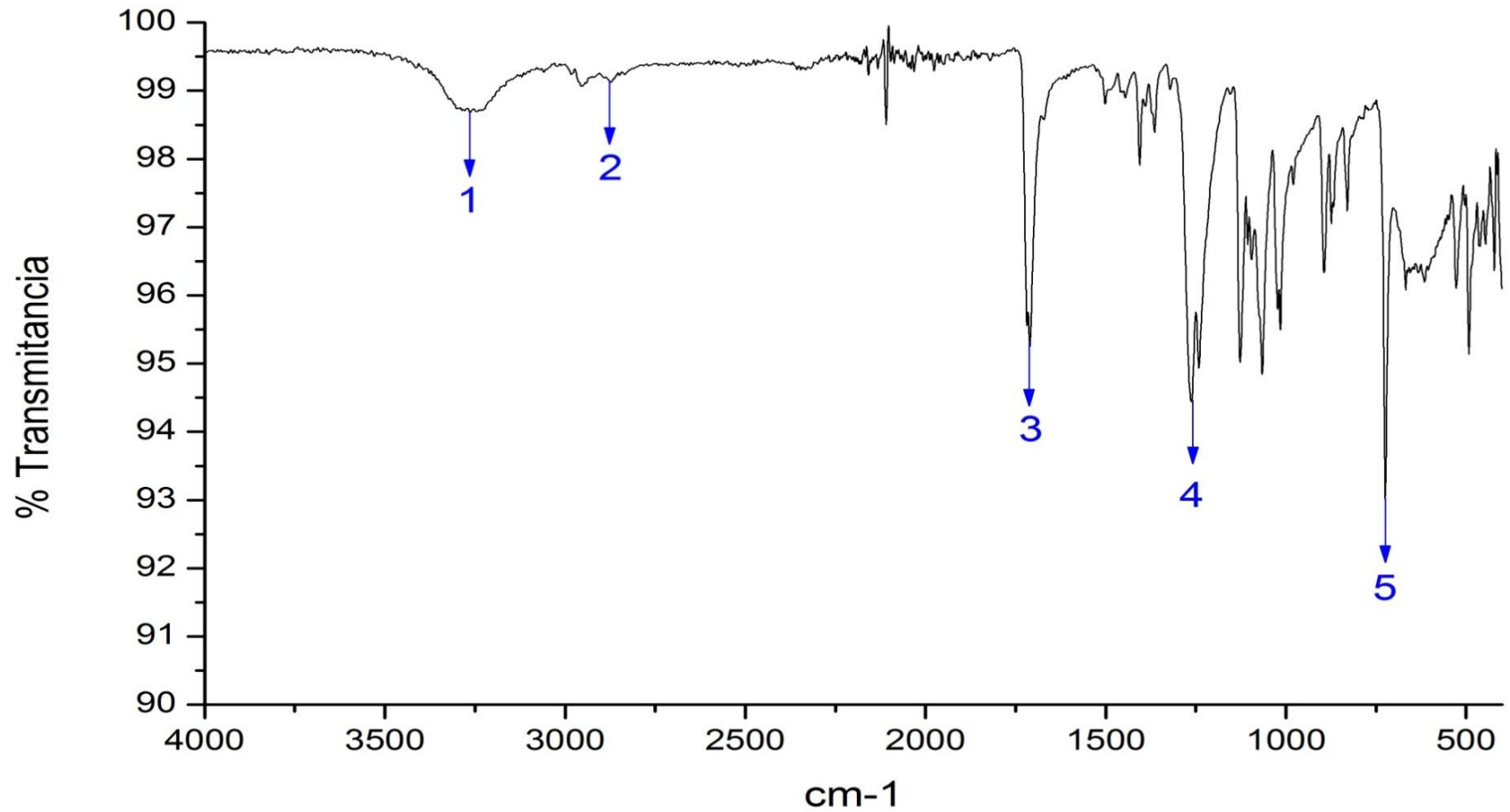


Figura 38: Espectro IR de cristales obtenidos en la relación 4:1

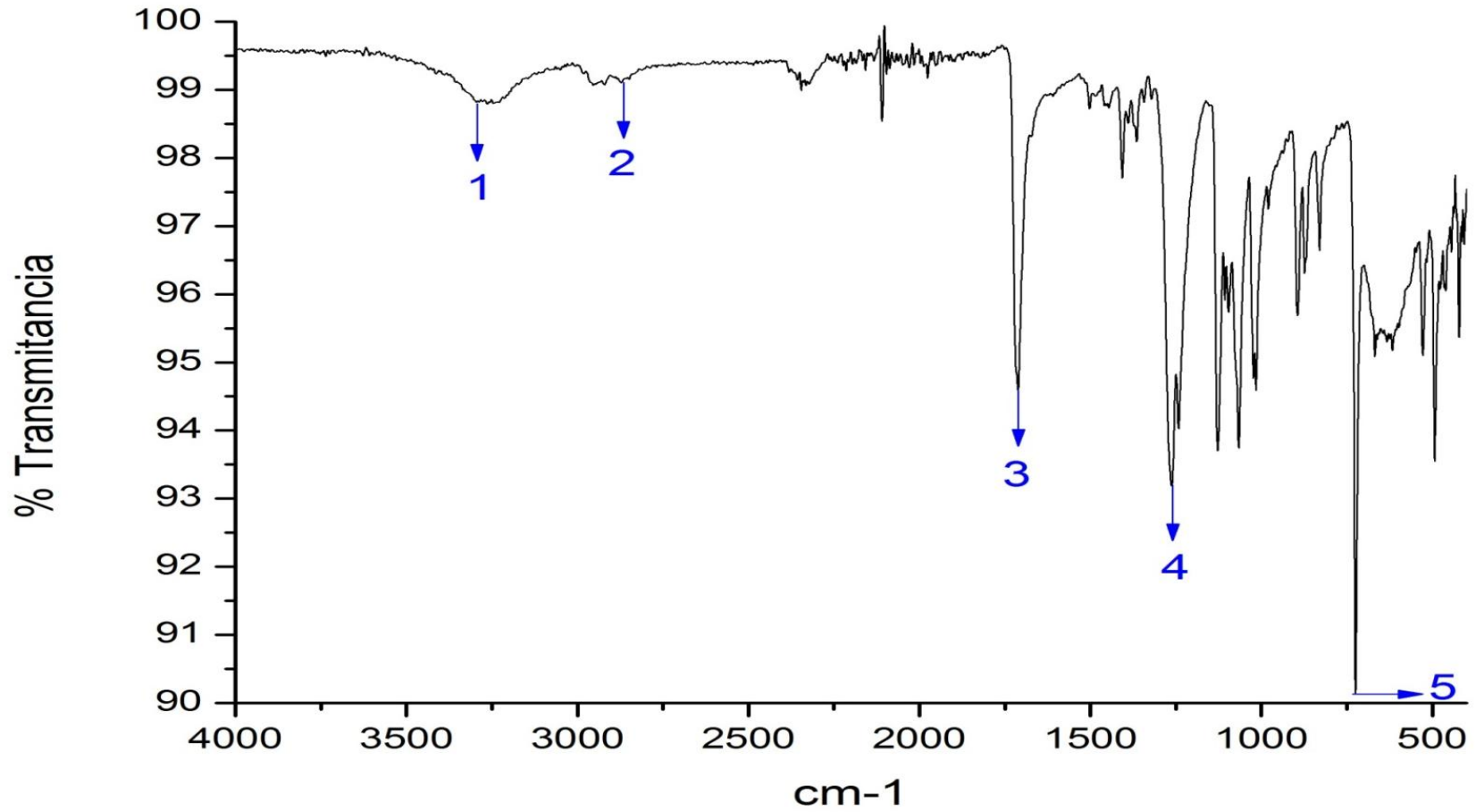


Figura 39: Espectro IR de cristales obtenidos en la relación 6:1

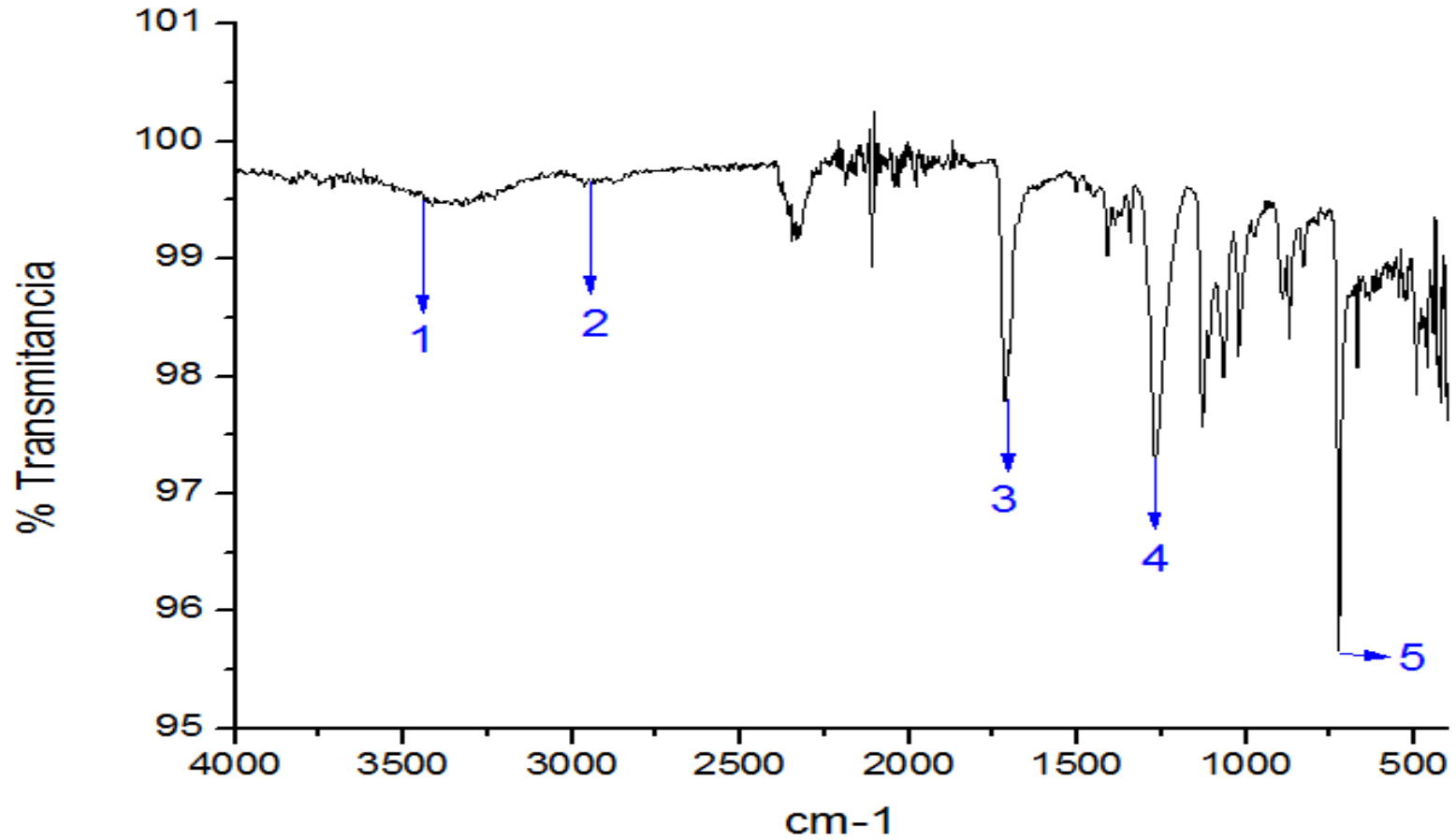


Figura 40: Espectro IR de cristales obtenidos en la relación 8:1



De acuerdo con la siguiente tabla²⁰ se pueden interpretar:

Figura 9: Interpretación de los espectros del BHET

Posición (cm ⁻¹)	Grupo	
- 3446	-OH de un alcohol terminal	1
2962 - 2877	Cadena alquílica del grupo étilen éster	2
- 1712	C = O carbonilo del grupo éster	3
1280-1250	Anillo aromático (ftalatos y benzoatos)	4
- 725	C- H de anillo aromático	5

De acuerdo a la interpretación de espectros, los de concentración 4:1 y 6:1 presentan todos los picos característicos del BHET, por lo que también se tomara en cuenta cual tuvo un mejor rendimiento y con esto se valorara cual es la mejor proporción.

Obtención del rendimiento molar¹⁵

$$Y (\%) = \frac{\frac{W_{BHET,f}}{MW_{BHET}}}{\frac{W_{PET,0}}{MW_{PET}}} * 100$$

Dónde:

$$MW_{BHET} = 254 \frac{g}{mol}$$

$$MW_{PET} = 192 \frac{g}{mol}$$



Resultados obtenidos:

Proporción:	Rendimiento molar (%)
4:1	67.56
6:1	41.45
8:1	37.26

Después de la realización de varios experimentos a diferentes condiciones se puede concluir que tomando en cuenta los espectros y el rendimiento molar, se tiene que la proporción 4:1 es la mejor, por lo que se desecha la hipótesis, ya que es al contrario en este caso de estudio, a menor proporción de EG, mayor rendimiento molar.



Conclusiones:

Se logró sintetizar BHET a partir del PET de envases comerciales post-consumo por el método de la glicólisis.

En base a los datos experimentales que se obtuvieron, se concluye, que la hipótesis (a mayor proporción de E se rechaza, ya que la proporción que obtuvo mejor rendimiento molar (67.56%) fue la de relación 4:1, es decir, de acuerdo a la relación molar EG:PET, con las mismas proporciones de PET y Acetato de Zinc, a las mismas condiciones de reacción en temperatura y presión. Esto va de acuerdo a algunos autores que mencionan que el rendimiento del BHET se incrementa cuando ésta relación incrementa, en nuestro experimento fue al contrario.

Por otro lado, la reacción se ve favorecida, en cuanto a la disminución de tiempo de síntesis con la temperatura, es decir, si se controla entre 190°C y 210°C, solo se requieren 3 horas para que se lleve a completar la reacción, en cambio, si se tiene una temperatura menor se extiende el tiempo de reacción hasta por 24 horas aproximadamente, esto se ve claramente por que no se disuelve por completo el PET.

Se comprobó que la reacción de Glicolisis catalizada con Acetato de Zinc y utilizando Etilen Glicol como solvente, es mejor en comparación con otros métodos de reciclaje del PET, ya que no se necesita utilizar una presión diferente a la atmosférica. Así mismo las condiciones de calentamiento son más viables ya que son controlables, una vez que se encontró el medio de calentamiento adecuado.

Un factor determinante en el proceso fue el agregarle el agua a 94°C en exceso y la primera filtración, ya que esto eliminaba las impurezas y se disolvía el EG remante, lo que propició la obtención de un BHET más puro.



BIBLIOGRAFIA:

1. Argueta Amador Alfredo, 2006 , “Proyecto de Inversión en una Planta de PET en el estado de Puebla”, tesis para M.C en Administración de Empresas con especialidad en Proyectos de Inversión, Puebla México, Universidad de las Américas Puebla “Escuela de Administración de Empresas y Mercadotecnia”
2. Automatismo Industrial, “Información técnica del PET”, disponible en <<http://www.st-1.com.ar/st.php>> (Visitada el 16 de mayo del 2012)
3. Blanco Vargas Rafael (2000) , Enciclopedia de los Plásticos, Segunda Edición, México, Centro Empresarial Del Plástico SA de CV, Tomo 1y Tomo 3
4. EL Ecologista, “El problema Ambiental del PET”, disponible en <http://www.elecologista.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=108&Itemid=65> (Visitado el 20 de Enero del 2013)
5. Elvira Schwansee, *Medio Ambiente, Conservación y Puntos Intermedios*, “El Mexicano y su botella de PET” (Enero 2007).
6. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad de Valladolid, “ Tipos de PET y sus Características”, disponible en <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/tipos_de_pet.htm> (Visitada el 6 de Marzo del 2013)



7. Evertis Packaging Solution, disponible en <
<http://www.evertis.com/en/home>> (Visitado el 25 marzo 2013)
8. Expoknews. Diario de RSE y Sustentabilidad(Octubre 2012), “Reciclaje de PET en México”, revista Equilibrio N° 50
9. Fundacion para la investigación y el desarrollo ambiental, “Polietilen Tereftalato”
disponible en
<[http://www.fida.es/esES/medio%20ambiente/112/718_Tereftalato%20de%20Polietileno%20\(PET\).aspx](http://www.fida.es/esES/medio%20ambiente/112/718_Tereftalato%20de%20Polietileno%20(PET).aspx)> (Visitada el 6 Marzo del 2013)
10. Herrera R.; Estrada A. 2012, “Despolimerización de botellas de Poli(Tereftalato de Etileno) (PET) Post-Consumo mediante Glicolisis. Efecto del Catalizador y del tipo de Glicol.” Revista Iberoamericana de Polímeros, Volumen 13 (3), pg.117-129.
11. IMPI, Seminario “La Era del Plástico” EL mundo de los Plásticos, México, Centro Empresarial del Plástico SA de CV, 80 p.
12. Jessye, “Problema Ambiental del PET”, disponible en <
<http://clubensayos.com/Temas-Variados/EL-PROBLEMA-AMBIENTAL-DEL-PET/177407.html>> (Visitado 20 de enero 2013)
13. L.G Wade Jr. 2004. Química Orgánica, Quinta Edición, Madrid, Pearson Educación SA de CV, 1296 p.
14. Loeza Medina María Auxilio. 2011, “Obtención del Ácido Tereftalico a partir de Residuos de PET”, Tesis de M.C. de Ingeniería Ambiental, Michoacán México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 56 p.



15. López Fonseca R. (2010), Chemical recycling of post-consumer PET wastes by glycolysis in the presence of metal salts, "Polymer Degradation and Stability 95", Journal ELSEVIER Ltd. All rights reserved, Marzo 2010, 1022-1028 p.
16. Machorro Juan Carlos (Mayo 2011), Retos del Reciclado del PET en México, disponible en juancarlosmachorro.blogspot.mx/2011/05/retos-del-reciclado-de-pet-en-mexico.html (Visitado el 12 Enero 2013)
17. Mariano (Mayo 2011), "Proceso de Reciclaje del PET" , disponible en <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/07/reciclado-quimico-de-pet.html> (Visitado el 10 de Enero 2013)
18. Mariano (Julio 2011), "Reciclado Químico del PET" , disponible en <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/07/reciclado-quimico-de-pet.html> (Visitado el 09 de Septiembre 2012)
19. Modern Plastic y Harper Charles A. (2004), "Manual de Plásticos", México, Mc Graw Hill Interamericana Editers SA de CV, Volumen II.
20. Moral A., et al, Depolimerization of PET bottle wastes to produce high-value BHET monomer using ethylenglycol, University of Valladolid, Memorias de congreso The 8th International Conference on Chemical and Process Engineering , Junio 2007
- 21 Prisa Digital SL- Gran Vía 32- Madrid España, "El Reciclado del Plástico", disponible en <http://www.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?anchor=klpingtcn&tip o=imprimir&titulo=Imprimir%20A%E2%80%A6> (Visitado el 12 Enero 2013)



- 22 Reyes Carcaño Josué Ricardo. 2009, “Estudio de factibilidad para a instalación de una planta recicladora de envases PET” tesis para Ingeniero Industrial, México DF, Instituto Politécnico Nacional, 121 p.

- 23 Robledo Franco Juan Carlos, Noviembre 2004, “Despolimerización de PET como alternativa de Reciclado”, tesis para Ingeniero de Proceso, Medellín Colombia, Universidad EAFIT, 76 p

- 24 Yurkanis Bruice Paula. 2008, Química Orgánica, Quinta Edición, México, Pearson Educación de México SA de CV, 1440 p.