



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE  
CATALIZADOR EN EL RENDIMIENTO DE REACCIÓN DE  
GLUCÓLISIS DE POLI TEREFALATO DE ETILENO (PET)  
POST-CONSUMO**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTORA:** MICHELE CRISTINA ALVARADO GUILCAPI

**DIRECTOR:** Ing. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES M.Sc.

Riobamba – Ecuador

2021

**© 2021, Michele Cristina Alvarado Guilcapi**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Michele Cristina Alvarado Guilcapi declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 15 de septiembre de 2021

---

**Michele Cristina Alvarado Guilcapi**

**060426494-5**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del trabajo de Integración Curricular certifica que: El trabajo de Integración Curricular, : Tipo: Proyecto de Investigación, : **“DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE CATALIZADOR EN EL REDIMIENTO DE REACCIÓN DE GLUCÓLISIS DE POLI TEREFTALATO DE ETILENO (PET) POST-CONSUMO”**, realizado por la señorita **MICHELE CRISTINA ALVARADO GUILCAPI**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Danielita Fernanda Borja Mayorga M.Sc <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-09-15
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes M.Sc. <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	_____	2021-09-15
Ing. Linda Mariuxi Flores Fiallos M.Sc <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-09-15

## **DEDICATORIA**

Mi trabajo de investigación lo dedico con mucha emotividad y alegría a mis padres: Néstor Alvarado y Norma Guilcapi, quienes con su sacrificio, esfuerzo y dedicación me han forjado con responsabilidad y buenos valores a lo largo de mi vida, enalteciendo ese don tanpreciado de ahínco y persistencia para vencer dificultades y alcanzar ese mérito de ser una profesional al servicio de la sociedad y la patria, demostrando que gracias a ellos he podido llegar a alcanzar un peldaño en la vida.

Michele

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a Dios y a la virgen Dolorosa, por haberme otorgado la vida además de haberme regalado la oportunidad de tener una hermosa y numerosa familia que siempre me ha apoyado en los momentos más difíciles para alcanzar el éxito deseado.

Una inmensa gratitud a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y en especial a la Facultad de Ciencias por abrirme sus puertas y formarme profesionalmente. De manera especial, agradezco al Ing. Paúl Palmay y a la Ing. Linda Flores, por la confianza que me brindaron a lo largo del desarrollo del presente trabajo de investigación, por su entrega, su paciencia, profesionalismo y sobre todo por haber sido un soporte y guía para avanzar progresivamente el desarrollo del presente trabajo de titulación.

Un agradecimiento profundo a mis padres Néstor y Norma por su apoyo incondicional en todos y cada uno de los logros que hasta el día de hoy he alcanzado, es gracias a ustedes, en la trayectoria de mi vida jamás terminaré de pagar todas sus bondades, esfuerzo, entrega y sacrificio tanto moral como económico para conmigo. Estoy recibiendo la mejor herencia que los padres pueden dejar a sus hijos como lo es la educación y sobre todo los valores que me han inculcado desde niña, cumplir con responsabilidad y humildad.

A Cristian, quién inesperadamente llegó a mi vida y en poco tiempo se ha ganado mi cariño y confianza, gracias por su apoyo, tranquilidad, paz y fuerza para continuar.

Finalmente, a mis mejores amigos, Mishell, Kerly, Anabeth, Sebastián, Frozen y Daniel quienes de alguna u otra forma me apoyaron y acompañaron a lo largo de mi carrera universitaria.

Michele

## TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

## CAPÍTULO I

<b>1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Antecedentes de la investigación.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Fundamentación Teórica .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.1. <i>Propiedades químicas de las botellas PET</i>.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.1.1. <i>Generalidades</i>.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.1.2. <i>Clasificación de los polímeros</i>.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.2. <i>Tereftalato de polietileno (PET)</i>.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2.2.1. <i>Estructura y morfología del PET</i>.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2.2.2. <i>Propiedades físicas y químicas del PET</i>.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2.2.3. <i>Obtención del PET</i>.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2.2.4. <i>Reciclaje del Poli Tereftalato de Etileno</i>.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2.3. <i>Reciclaje Químico del PET</i>.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.4. <i>Glucólisis de PET</i>.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.5. <i>Métodos de Glucólisis</i> .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.5.1. <i>Glucólisis Catalizada</i>.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.6. <i>Catalizadores a base de metales</i> .....</b>	<b>22</b>
<b>1.2.6.1. <i>Glucólisis asistida por solventes</i>.....</b>	<b>24</b>
<b>1.2.6.2. <i>Glucólisis Supercrítica</i> .....</b>	<b>24</b>
<b>1.2.6.3. <i>Glucólisis asistida por microondas</i> .....</b>	<b>25</b>
<b>1.2.6.4. <i>Bis (2-hidroxietil) tereftalato (BHET)</i> .....</b>	<b>25</b>
<b>1.2.7. <i>Aplicaciones del producto glucolizado BHET</i>.....</b>	<b>25</b>

## CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO .....	26
2.1.	Objetivos.....	26
2.1.1.	<i>Objetivo General</i> .....	26
2.1.2.	<i>Objetivos Específicos</i> .....	26
2.2.	Hipótesis y especificación de variables.....	26
2.2.1.	<i>Hipótesis General</i> .....	26
2.2.2.	<i>Hipótesis Específicas</i> .....	26
2.2.3.	<i>Identificación de Variables</i> .....	27
2.2.4.	<i>Operacionalización de Variables</i> .....	28
2.2.5.	<i>Matriz de Consistencia</i> .....	30
2.3.	Tipo y Diseño de Investigación .....	32
2.3.1.	<i>Tipo de investigación</i> .....	32
2.4.	Método de investigación .....	32
2.5.	Diseño experimental de la investigación .....	32
2.6.	Unidad de Análisis .....	36
2.7.	Población de Estudio .....	36
2.8.	Tamaño de Muestra.....	36
2.9.	Selección de muestra.....	36
2.10.	Técnicas de recolección de datos .....	37
2.10.1.	<i>Caracterización de la materia prima</i> .....	38
2.10.2.	<i>Metodología para la Identificación del PET</i> .....	39
2.10.3.	<i>Espectroscopia FTIR</i> .....	40
2.10.4.	<i>Preparación de la muestra</i> .....	43
2.10.5.	<i>Glucólisis catalizada de PET</i> .....	45
2.10.6.	<i>Caracterización del producto de Glucólisis catalizada</i> .....	52
2.10.7.	<i>Conversión de PET y rendimiento del BHET</i> .....	52
2.10.8.	<i>Análisis estadístico</i> .....	53

## CAPÍTULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	55
3.1	RESULTADOS .....	55
3.1.1	<i>Ensayos para la caracterización del PET</i> .....	55
3.1.2	<i>Caracterización por espectroscopia infrarroja por transformada Fourier (FTIR)</i> .	57



<b>3.1.3</b>	<b><i>Reciclaje químico de poli tereftalato de etileno por medio de glucólisis catalizada.</i></b>	<b>58</b>
<b>3.1.3.1</b>	<i>Condiciones de reacción.....</i>	<b>59</b>
<b>3.1.3.2</b>	<i>Rendimiento de los productos finales.....</i>	<b>61</b>
<b>3.1.3.3</b>	<i>Caracterización de los productos de glucólisis catalizada de PET.....</i>	<b>67</b>
<b>3.1.3.4</b>	<i>Análisis Estadístico.....</i>	<b>70</b>
<b>3.2.</b>	<b>Hipótesis.....</b>	<b>73</b>
<b>3.2.1.</b>	<b><i>Hipótesis General.....</i></b>	<b>73</b>
<b>3.2.2.</b>	<b><i>Hipótesis Específicas.....</i></b>	<b>74</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>76</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>77</b>
	<b>GLOSARIO</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Clasificación de los polímeros .....	7
<b>Tabla 2-1:</b>	Resinas de polímeros termoplásticos .....	8
<b>Tabla 3-1:</b>	Propiedades del PET .....	11
<b>Tabla 4-1:</b>	Tecnologías de reciclaje primario .....	13
<b>Tabla 5-1:</b>	Tecnologías de reciclaje terciario.....	14
<b>Tabla 6-1:</b>	Métodos de degradación química del PET.....	17
<b>Tabla 7-1:</b>	Catalizadores de procesos de despolimerización glucolítica .....	21
<b>Tabla 8-1:</b>	Propiedades físicas del Acetato de Zinc.....	22
<b>Tabla 9-1:</b>	Propiedades físicas del carbonato de sodio.....	23
<b>Tabla 10-1:</b>	Propiedades físicas del Óxido de zinc.....	24
<b>Tabla 1-2:</b>	Identificación de variables que intervienen en el proceso de glucólisis .....	27
<b>Tabla 2-2:</b>	Racionalización de variables que intervienen en proceso de Glucólisis de PET..	28
<b>Tabla 3-2:</b>	Matriz de consistencia para el trabajo de investigación.....	30
<b>Tabla 4-2:</b>	Densidades de los diferentes polímeros .....	38
<b>Tabla 5-2:</b>	Metodología utilizada para la caracterización de la materia prima.....	39
<b>Tabla 6-2:</b>	Características del comportamiento térmico del PET.....	40
<b>Tabla 7-2:</b>	Especificaciones Espectrofotómetro Infrarrojo.....	41
<b>Tabla 8-2:</b>	Metodología para el análisis de espectroscopia por Transformada de Fourier.....	41
<b>Tabla 9-2:</b>	Absorción espectral principal en $[\text{cm}]^{-1}$ de los grupos funcionales del PET...	42
<b>Tabla 10-2:</b>	Especificaciones cantidad de catalizador.....	47
<b>Tabla 1-3:</b>	Caracterización de la muestra de PET .....	55
<b>Tabla 2-3:</b>	Absorción espectral principal $[\text{cm}]^{-1}$ de los grupos funcionales del PET.....	57
<b>Tabla 3-3:</b>	Porcentaje de conversión de PET (X) .....	63
<b>Tabla 4-3:</b>	Rendimiento de BHET (Y) .....	63
<b>Tabla 5-3:</b>	Rendimiento promedio BHET obtenido expresado en porcentaje.....	65
<b>Tabla 6-3:</b>	Absorción espectral principal $\text{cm}^{-1}$ producto catalizado por Óxido de Zinc....	67
<b>Tabla 7-3:</b>	Absorción espectral principal $\text{cm}^{-1}$ producto catalizado por Acetato de Zinc.	68
<b>Tabla 8-3:</b>	Absorción espectral principal $\text{cm}^{-1}$ del producto catalizado por Carbonato de Sodio.....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Estructura del Tereftalato de polietileno .....	10
<b>Figura 2-1:</b>	Obtención de BHET por esterificación y transesterificación .....	12
<b>Figura 3-1:</b>	Esquema reciclaje químico del PET .....	15
<b>Figura 4-1:</b>	Esquema de glucólisis de Poli tereftalato de Etileno.....	20
<b>Figura 5-1:</b>	Mecanismo de reacción de Glucólisis catalizada por metales pesados .....	21
<b>Figura 6-1:</b>	Estructura química del Acetato de zinc .....	22
<b>Figura 7-1:</b>	Estructura química del Carbonato de sodio.....	23
<b>Figura 8-1:</b>	Estructura química del Óxido de zinc.....	24
<b>Figura 9-1:</b>	Estructura del BHET .....	25
<b>Figura 1-2:</b>	Diagrama de flujo del proceso de Glucólisis de PET .....	34
<b>Figura 2-2:</b>	Diseño experimental del proyecto de investigación, Glucólisis de PET .....	35
<b>Figura 3-2:</b>	Selección de la materia prima de PET post-consumo .....	37
<b>Figura 4-2:</b>	Espectrofotómetro Infrarrojo.....	40
<b>Figura 5-2:</b>	Espectro estándar IR de Poli Tereftalato de Etileno.....	42
<b>Figura 6-2:</b>	Espectro FTIR de BHET .....	43
<b>Figura 7-2:</b>	Muestra de PET .....	44
<b>Figura 8-2:</b>	Esquema de preparación de muestras de PET post-consumo.....	45
<b>Figura 9-2:</b>	(a) Pesaje de la muestra de PET; (b) Pesaje del catalizador; (c) Volumen EG. ...	47
<b>Figura 10-2:</b>	Mezcla PET/Catalizador.....	48
<b>Figura 11-2:</b>	Equipo para el proceso de Glucólisis catalizada de PET.....	48
<b>Figura 12-2:</b>	a) Muestra líquida después de reacción; (b) Muestra enfriada temperatura ambiente. .....	49
<b>Figura 13-2:</b>	PET sólido sin reaccionar.....	49
<b>Figura 14-2:</b>	Lavado de la muestra con agua caliente .....	50
<b>Figura 15-2:</b>	(a) Equipo de filtrado; (b) Muestra lavado BHET; (c) Torta de filtrado lechosa	50
<b>Figura 16-2:</b>	Cristales de BHET obtenidos después de refrigeración .....	51
<b>Figura 17-2:</b>	Pesaje del producto final.....	51
<b>Figura 18-2:</b>	Muestra posterior a la trituración.....	52
<b>Figura 1-3:</b>	Espectro IR de la muestra de Poli Tereftalato de Etileno post-consumo .....	57
<b>Figura 2-3:</b>	Estructuras de compuestos resultantes de la glucólisis de PET.....	59
<b>Figura 3-3:</b>	Producto glucólisis 200°C (a) Enfriada temperatura ambiente (b) Filtrado.....	60
<b>Figura 4-3:</b>	Rendimiento de BHET en la reacción de glucólisis, efecto del tiempo .....	61
<b>Figura 5-3:</b>	(a) Producto de glucólisis catalizada por $C_4H_6O_4Zn$ (b) Producto de glucólisis catalizada por ZnO (c) Producto de glucólisis catalizada por $Na_2CO_3$ .....	61
<b>Figura 6-3:</b>	Espectro IR de BHET catalizada por Óxido de Zinc.....	67

<b>Figura 7-3:</b>	Espectro IR de BHET catalizada por Acetato de zinc.....	68
<b>Figura 8-3:</b>	Espectro IR de BHET catalizada por Carbonato de sodio.....	69
<b>Figura 9-3:</b>	Test ANOVA para 2 factores .....	71
<b>Figura 10-3:</b>	Test de TUKEY.....	72
<b>Figura 11-3:</b>	Test de TUKEY para la prueba de hipótesis .....	74

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b>	Rendimiento promedio obtenido con los tres tipos de catalizadores.....	65
<b>Gráfico 2-3:</b>	Rendimiento promedio obtenido validación de hipótesis.....	75

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

**ANEXO B:** CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA Y PRODUCTOS DE  
GLUCÓLISIS

**ANEXO C:** CÁLCULOS REALIZADOS PARA EL PROCESO DE GLUCÓLISIS DE PET

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue realizar la degradación química del Poli Tereftalato de Etileno (PET) post-consumo, vía glucólisis catalizada, determinando la influencia del tipo de catalizador en el rendimiento de reacción, para la obtención de Bis (2- hidroxietil) Tereftalato (BHET). Las sustancias empleadas como catalizadores de la reacción fueron Acetato de Zinc, Carbonato de Sodio y Óxido de Zinc en cantidades de 0,04g y 0,05g; en 4 g de PET. La glucólisis catalizada de PET se realizó a nivel de laboratorio en un sistema adaptado con un balón de dos bocas y la utilización de etilenglicol (EG) como disolvente en condiciones de presión atmosférica y además tomando en consideración ciertos parámetros como la temperatura de reacción que oscila en un intervalo de 180-190 grados Celsius, tiempo de reacción de 2 horas, proporción PET/EG de 1:3, obteniéndose como producto final un polvo color blanquesino correspondiente al monómero BHET. Para la caracterización de la materia prima y producto glucolizado, se emplearon técnicas de Espectroscopía Infrarroja FTIR, con el objetivo de identificar los grupos funcionales que confirman su presencia. Los resultados de rendimiento promedio fueron de 85,16%, 82,06% y 80,69% en producto glucolizado para cada una de las sustancias respectivamente. El análisis de resultados demostró que, haciendo uso del acetato de zinc como catalizador de glucólisis de PET, éste presentó resultados de rendimiento más altos, correspondientes al 85,16%, debido a que éste posee el metal más activo  $Zn^{2+}$  y afín para la activación de los grupos carbonilo del PET, determinándose así que, es el catalizador con el que se logró controlar el proceso con mayor facilidad para alcanzar efectos óptimos. Se recomienda emplear la técnica de glucólisis como una alternativa económicamente viable para futuras investigaciones en cuanto al reciclaje de residuos plásticos de PET.

**Palabras clave:** <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA> <RECICLAJE QUÍMICO> <POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)> <DESPOLIMERIZACIÓN> <GLUCÓLISIS CATALIZADA> <RENDIMIENTO DE REACCIÓN>.



1519-DBRA-UTP-2021

## ABSTRACT

The objective of this research was to carry out the chemical degradation of Post-consumer Poly Ethylene Terephthalate (PET), via catalyzed glycolysis, determining the influence of the type of catalyst on the reaction performance, to obtain Bis (2- hydroxyethyl) Terephthalate (BHET). The substances used as catalysts for the reaction were Zinc Acetate, Sodium Carbonate and Zinc Oxide in quantities of 0.04g and 0.05g; in 4 g of PET. The catalyzed glycolysis of PET was carried out at the laboratory level in an adapted system with a two-mouth balloon and the use of ethylene glycol (EG) as a solvent under atmospheric pressure conditions and also taking into account certain parameters such as the reaction temperature that oscillates 180-190 degrees Celsius range, 2-hour reaction time, 1: 3 PET / EG ratio. An off-white powder corresponding to the monomer BHET was obtained as the final product. For the characterization of the raw material and glycolyzed product, FTIR Infrared Spectroscopy techniques were used, in order to identify the functional groups that confirm their presence. The average yield results were 85.16%, 82.06% and 80.69% in glycolyzed product for each of the substances respectively. The analysis of results showed that, using zinc acetate as a catalyst for PET glycolysis, it presented higher yield results, corresponding to 85.16%, because it has the most active metal  $Zn^{2+}$  and related to activation. of the carbonyl groups of PET, thus determining that it is the catalyst with which it was possible to control the process more easily to achieve optimal effects. It is recommended to use the glycolysis technique as an economically viable alternative for future research regarding the recycling of PET plastic waste.

**Keywords:** <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY> <CHEMICAL RECYCLING> <POLYTEREPHTHALATE OF ETHYLENE (PET)> <DEPOLYMERIZATION> <CATALYZED GLYCOLYSIS> <REACTION PERFORMANCE>.



## INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación se centró en la obtención del máximo rendimiento de BHET vía glicólisis catalizada de botellas de PET post-consumo considerando los parámetros óptimos para el proceso y tomando como variables de estudio el tipo de sustancia utilizada como catalizador así como también la cantidad empleada para en la reacción.

El poli tereftalato de etileno (PET) es un poliéster termoplástico semicristalino utilizado en diversas aplicaciones, además de ser un material versátil en la economía global, su popularidad es atribuida debido a sus propiedades y bajos costos de producción convirtiéndose así en el material de origen de los envases de primera necesidad, la resiliencia de su naturaleza no degradable hace que sus residuos incrementen con el pasar de los años convirtiéndose de ésta forma en un agente contaminante y constituyendo un peligro para el medio ambiente después de su uso (Raheem et al., 2019, p.1052).

Yasir et.al. (2017) menciona que la naturaleza química del PET hace que éste material sea considerado apto para el reciclado por medio de diversos métodos, siendo así, el reciclaje, un proceso muy importante desde el punto de vista medioambiental. Destacan cuatro métodos de reciclaje de residuos plásticos, de entre ellos el reciclaje: (1) Mecánico, (2) Térmico, (3) Químico y (4) Recuperación energética, dentro de ellos, específicamente el reciclaje químico ha sido objeto de investigación a lo largo del tiempo, ya que a través de éste se pueden obtener materiales diferentes a los de los residuos originales de PET, el reciclaje químico o quimiólisis de PET post-consumo brinda la posibilidad de producir productos de gran utilidad industrial incrementando el ciclo de vida de los productos basados en PET.

La glucólisis de PET post-consumo, puede ser descrita como un proceso de despolimerización molecular por transesterificación entre el etilenglicol (EG) como disolvente y los grupos funcionales éster del PET, los principales productos de la reacción de glucólisis son monómeros de Bis (2-hidroxietil) tereftalato mejor conocido por sus siglas BHET.

La cinética química de la reacción de glucólisis demuestra que la reacción sin la adición de un catalizador puede darse en un tiempo de hasta 8 horas, es decir es una reacción extremadamente lenta, por lo que se ha investigado el uso de catalizadores y su influencia en el rendimiento de reacción. Existen varios parámetros que intervienen directamente en la velocidad de reacción de despolimerización de PET y ésta depende de varios factores como: (1) Temperatura, (2) Relación PET/EG, (3) Cantidad PET/Catalizador (Shojaei et al., 2020, p.2912).

Estudios realizados por Bahramian (2021) han demostrado que los rendimientos de reacción de glucólisis de PET mejoran con la utilización de catalizadores como acetato de zinc, carbonato de sodio y bicarbonato de sodio (Bahramian, 2021).

La investigación está estructurada por capítulos, la misma que se detalla a continuación:

Capítulo 1. Marco teórico referencial. Parte de los antecedentes de la investigación en consideración a procesos realizados con anterioridad, para seguidamente centrarse en la fundamentación teórica que se enfoca las propiedades químicas de las botellas PET y la clasificación de polímeros, para adentrarse específicamente en el tereftalato de polietileno (PET) en donde se determina su estructura, propiedades físicas y químicas y la obtención misma del PET en base al reciclaje de botellas plásticas. Se hace referencia también al método de glucólisis, los tipos de catalizadores y los solventes.

Capítulo 2. Marco metodológico. Se enfoca en las hipótesis con su respectiva operacionalización, para seguidamente determinar el tipo y diseño de investigación, los métodos, población y muestra, técnicas de recolección de datos y la caracterización de la materia prima con la metodología para la identificación del PET. Se hace referencia también a la espectroscopia FTIR de la materia prima, glucólisis catalizada de PET, la caracterización del producto de Glucólisis catalizada y el análisis estadístico.

Capítulo 3. Resultados y discusión. Se hace referencia a los ensayos para la caracterización PET, la caracterización mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), las condiciones de reacción, el rendimiento de los productos finales, la caracterización de los productos de glucólisis catalizada de PET y el análisis estadístico para poder comprobar las hipótesis planteadas.

## **Identificación del problema**

La tecnología y la industria ha crecido en los últimos años de manera acelerada a ello se suma el nuevo estilo de vida que la sociedad ha asumido, me refiero específicamente a la utilización tan grande de materiales plásticos como en el caso de aguas y gaseosas que después de terminar su líquido son arrojados en los basureros o calles, transformándose en calidad de desechos, los cuales posteriormente generan grandes problemas de contaminación para el medio ambiente, dentro de ello está la acumulación de envases en las riberas de los ríos y en los amplios espacios de las playas, generando un problema para la fauna marina.

De acuerdo a los datos emitidos por la Organización de las Naciones Unidas, se determina que en el mundo existe alrededor de 300 millones de toneladas de residuos plásticos y dentro de ello está que por lo menos unos 13 millones de toneladas de plásticos al año son arrojadas a los océanos, factor crítico que afecta a la biodiversidad, economía y salubridad de las personas y de otros seres vivos.

Según revelaciones de la ONU se manifiesta que, en Japón, la Unión Europea y América se identifica que existe la mayor producción de desechos plásticos y que solamente un 9% de desechos han sido reciclados de los 9.000 millones de toneladas producidas.

Dentro de los problemas críticos provocados por los desechos de los plásticos es por el tiempo de degradación porque se determina que tienen un período de descomposición de alrededor de 500 años.

### **Justificación**

La importancia de la investigación presente se centra en buscar alternativas, técnicas, científicas para obtener un producto a través del reciclaje de botellas mediante la identificación de la influencia del tipo de catalizador en el rendimiento de reacción de glucólisis de poli tereftalato de etileno (PET).

Es factible la realización de esta investigación en virtud de que permite hacer uso de varias vías de despolimerización de residuos plásticos (PET), partiendo de las técnicas tradicionales de reciclaje químico que posteriormente involucran reacciones de escisión de cadenas solvolíticas con la utilización de diferentes disolventes, tales como: (1) Aminólisis, (2) Hidrólisis, (3) Metanólisis y (4) Glucólisis, ésta última conlleva a la formación del monómero Bis (2-hidroxietil) Tereftalato (BHET) mismo que principalmente es utilizado como materia prima para la producción de PET o a su vez en la síntesis de copolímeros y poliésteres insaturados (Stoski et al., 2016,p. 1024).

Los beneficiarios de estos procesos de investigación y experimentación al reutilizar estos productos no solamente conllevan a la disminución de las grandes cantidades de plásticos en los botaderos, sino que es favorable en la reutilización en nuevos productos que sean útiles para el ser humano y a la vez es una alternativa para la conservación de los recursos fósiles y el deterioro del medio ambiente.

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 1.1. Antecedentes de la investigación

El creciente consumo y utilización de los plásticos específicamente el poli tereftalato de etileno PET, se ha convertido en un tema de estudio de interés actual, principalmente para la reducción del impacto del mismo en el medio ambiente ya que conduce a la acumulación de residuos no biodegradables dando como resultado la contaminación a gran escala, en el aire, suelo así como también aguas subterráneas contaminadas con productos peligrosos, incluyéndose también nano y microplásticos.

Además, es necesario tener en cuenta que el plástico representa una gran parte del consumo en lo que respecta a la sociedad antigua y moderna, con aplicaciones que involucran el uso de plástico que va desde aplicaciones en envases de un solo uso, hasta piezas de automóviles y materiales de construcción, siendo dicho material de preferencia debido a sus características y propiedades como el peso ligero que posee, durabilidad, excelente desgaste, resistencia química y bajos costos de producción

A nivel mundial, los envases de PET post-consumo son uno de los mayores contribuyentes a la generación de residuos plásticos, en el año 2018, la producción global mundial total de plástico fue de 359 millones de toneladas en donde solamente el 9% de los residuos han sido reciclados, el 12% de los residuos es la fracción correspondiente a la incineración y finalmente el 79% que termina en los vertederos contaminando el medio ambiente (Schwarz et al., 2021, pp. 331-342).

Si bien es cierto, en base al estudio elaborado por el Center for International Environmental Law (CIEL) menciona que en el año de 2019, la polución resultante de la producción global de plásticos y su posterior incineración sería igual a las emisiones de 189 centrales eléctricas a carbón considerándose como un gran problema medioambiental (National Geographic, 2020).

Es importante mencionar también que el 4% de la fracción de petróleo y gas natural considerados como recursos naturales no renovables, producido anualmente, es utilizado para la producción de polímeros, cada vez más escasos

En Ecuador, en base a los estudios realizados por el Banco Central del año 2019 menciona que, las importaciones de PET se han incrementado en un 5,4% desde el año 2009 en adelante, siendo así que en el año 2011 correspondieron a 47000 toneladas, haciendo énfasis en la eliminación de los mismos (Alomoto & Elizabeth, 2014).

Se han desarrollado diferentes estudios sobre Glucólisis de poli tereftalato de etileno a lo largo del tiempo, sin embargo existen varias compañías globales reconocidas a nivel mundial donde se ha adoptado el uso de ésta metodología para el reciclaje del polímero contribuyendo a la

disminución de la contaminación de éste tipo, empresas tales como DuPont, Goodyear, Shell Polyester, Zimmer, Eastman Kodak, entre otras (Shojaei et al., 2020, p. 2915).

Chen et.al (2015) realizaron estudios sobre la glucólisis de residuos de PET con EG en presencia de acetato de cobalto como catalizador con una relación PET/EG de 1:2 en donde se optimizó los parámetros que intervienen en la velocidad de la reacción, éstos son la temperatura, el tiempo y la cantidad de catalizador, la transformación óptima de productos de despolimerización de glucólisis se logró cuando la temperatura, el tiempo y la cantidad de catalizador fueron 190°C, un tiempo de 1,5 horas y 0,002 gramos de catalizador, respectivamente (Shojaei et al., 2020, p.2912).

Los acetatos de metales pesados utilizados como catalizadores y considerados como las sustancias más utilizados para la glucólisis de PET, Troev, et al. (2018) introdujo fosfato de titanio (IV) como un nuevo catalizador para la glucólisis de PET donde se demostró que ésta procede a un ritmo más rápido en presencia de este catalizador en comparación con las sales tradicionales de acetato de metales pesados como catalizadores (George & Kurian, 2014, p.14185).

Se demostró también que los cloruros de diferentes metales como zinc, litio, cadmio, magnesio y hierro puede catalizar la despolimerización de las botellas de PET vía glucólisis utilizando etilenglicol para la obtención del monómero puro BHET con un rendimiento equivalente al de las sales de acetato.

La glucólisis de botellas PET post-consumo también se ejecutó con el uso de sales ecológicas como el carbonato de sodio y bicarbonato de sodio como catalizadores donde se pudo notar que bajo condiciones idénticas de cantidad de catalizador y relación PET: EG similares a las experimentadas con los acetatos metálicos, obteniéndose rendimientos de BHET de 61% en comparación a los rendimientos obtenidos con catalizadores convencionales de 63% notándose diferencias mínimas en sus cifras (George & Kurian, 2014, p.14185).

Por otro lado, en la investigación realizada por Yunita, et.al (2016) fueron empleados óxidos como el óxido de calcio (CaO) como catalizador de glucólisis de PET investigando su eficacia para para la reacción, los parámetros de reacción utilizados fueron una temperatura de 192°C, tiempo de 2 horas y con una relación de peso PET/EG de 1:15, a presión atmosférica, obteniéndose con ello rendimientos en producto glucolizado de aproximadamente 76,41% (Shojaei et al., 2020, p.2915).

La eficiencia del catalizador convencional, acetato de zinc,  $Zn(Ac)^2$ , como catalizador para la reacción de glucólisis, se ha determinado examinando diferentes parámetros que se consideran los más influyentes dentro de la reacción, de entre ellos, el efecto del tiempo de reacción, éste en aproximadamente dos horas, donde se obtuvo casi el 70% de conversión y rendimientos equivalentes a la formación de aproximadamente 25 g de BHET a partir de 30 g de PET es decir 83% en peso (López-Fonseca et al., 2010, pp.312-320).

Además a lo largo del tiempo, se desarrolló el proceso de glucólisis, dentro del que se produce la transesterificación en las cadenas de PET con dioles para formar monómeros, utilizando acetato de metales como catalizador, uno de los acetatos más utilizados es el acetato de zinc mismo que

es el catalizador más conocido utilizado para la glucólisis de PET ya que muestra un buen rendimiento con una conversión glucolítica superior al 85% y un nivel moderado comercialmente aceptable tasa de conversión (Nguyet Thi Ho et al., 2018, pp.15-21).

Finalmente, se han realizado estudios de la influencia de la temperatura en la reacción de glucólisis de PET post-consumo catalizada por sales metálicas, donde se han obtenido rendimientos en producto glucolizado BHET de 70% a 80% con la utilización de acetato de zinc y carbonato de sodio como catalizadores de glucólisis a una temperatura de 196°C (Hu et al., 2020, p.430).

## **1.2. Fundamentación Teórica**

### ***1.2.1. Propiedades químicas de las botellas PET***

#### *1.2.1.1. Generalidades*

La industria de los plásticos ha logrado convertirse en una grave carga medioambiental a nivel mundial, en las últimas décadas, la producción mundial total de plásticos ha sido de 168 millones de toneladas en el año 1999 y 11 años más adelante aproximadamente 210 millones de toneladas en el año 2010, estimándose el aumento considerable de los mismos a medida que transcurre el tiempo (Kumar & Singh, 2020, pp.695-703).

Los plásticos forman parte de una enorme familia de polímeros, cada uno de ellos se construye con características propias que lo convierten en óptimo para su aplicación en lo que está orientado permitiendo así su gran eficiencia en el uso de los recursos, dichos plásticos son originarios de varias fuentes, dentro de ellas; como materias primas de origen fósil tales como petróleo y gas natural; de recursos renovables tales como almidón, aceites vegetales, caña de azúcar, entre otras (Plastics Europe, 2019).

#### *1.2.1.2. Clasificación de los polímeros*

Los polímeros, al ser una macromolécula de cadena larga formada por muchas unidades repetitivas unidas químicamente llamadas monómeros, se componen por carbono e hidrógeno siendo ésta una de las clases más comunes, sin embargo, otros polímeros se componen de heteroátomos como nitrógeno, silicio, oxígeno y fósforo, además éstos se clasifican de acuerdo a varios parámetros que van desde el tipo de técnica de polimerización utilizada en su síntesis, según la estructura del polímero, el método de polimerización y la más notable, según las fuerzas intermoleculares del que depende las propiedades del polímero (Babooram, 2020, pp.3-12).

A continuación, en la tabla 1-1 se describe cada clase de polímeros clasificados en función de las fuerzas intermoleculares que lo componen.






**Tabla 1-1:** Clasificación de los polímeros

<b>Clase</b>	<b>Descripción</b>
Elastómeros	Los elastómeros son aquellos polímeros que presentan un comportamiento elástico debido a sus cadenas extremadamente flexibles, éstos poseen fuerzas intermoleculares débiles, es decir que se pueden estirar fácilmente volviendo a su forma original una vez que se elimina la tensión.
Termoplásticos	Los termoplásticos son aquellos polímeros en los que las fuerzas intermoleculares que poseen resultan lo suficientemente fuertes como para evitar deformaciones a temperatura ambiente, los termoplásticos al ser sometidos al calor se ablandan debilitando las fuerzas intermoleculares que los componen, mientras que al momento de enfriarse éstos se convierten en una masa sólida, propiedad que facilita el reciclaje de este tipo de polímeros.
Termoestables	Los termoestables se refieren a aquellos polímeros que presentan aversión al calor, es decir, éstos no se derriten al calentarlos. Los polímeros termoestables presentan características tales como resistencia química y deformación mecánica, así como ataque de disolventes.
Fibras	Las fibras son aquellos polímeros característicos por la presencia de fuerzas intermoleculares muy fuertes que reducen la elasticidad y aumentan la resistencia a la tracción del polímero.

**Fuente:** (Babooram, 2020, pp. 3-12).

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

**Tabla 2-1:** Resinas de polímeros termoplásticos

Código	Abreviatura	Nombre	Punto de fusión (°C)	Aplicaciones
	PET	Polyethylene Terephthalate	250	Botellas de refrescos, agua, tarros de mantequilla de maní y mermelada, aparatos electrónicos
	HDPE	High Polyethylene Density	130	Botellas de leche, jugo y agua, bolsas, algunas botellas de champú / artículos de tocador
	PVC	Polyvinyl Chloride	240	Películas adhesivas para uso no alimentario, cables eléctricos; tuberías, discos de vinilo
	LDPE	Low Polyethylene Density	120	Bolsas de alimentos congelados, botellas comprimibles de miel, mostaza, películas adhesivas, tapas de contenedores flexibles
	PP	Polypropylene	173	Vajillas reutilizables para microondas, baterías, envases de yogur y mantequilla, recipientes desechables para microondas, vasos desechables, tapas de botellas de refrescos, platos





PS

Polystyrene

100

Cartones de huevos, vasos, platos, bandejas y cubiertos desechables, recipientes para llevar desechables



Otros

Poliuretano (PU)  
Acrilonitrilobutadieno-  
estireno (ABS)  
Policarbonato (PC)

--

Se usa en galones de botellas de agua, bolsas para cocción, piezas vehiculares, CDs, aislantes, tuberías, garrafones de agua.

---

**Fuente:** (Kumar & Singh, 2020, pp. 695-703).

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

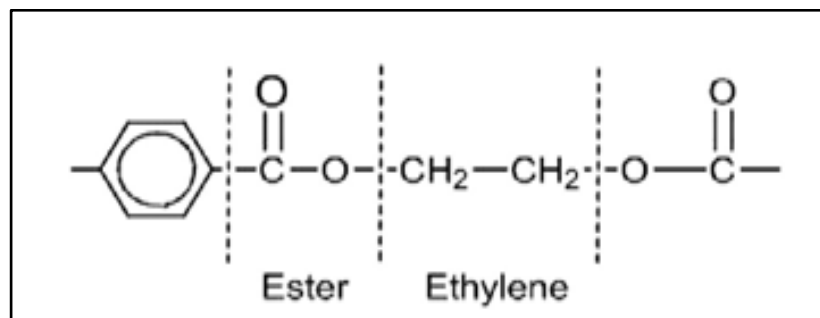
### 1.2.2. Tereftalato de polietileno (PET)

El tereftalato de polietileno (PET), se trata de uno de los polímeros termoplásticos mayormente generado y más consumido a nivel mundial por parte de toda una sociedad utilizado para un sin número de aplicaciones como en la industria textil, industria de electrónica, industria del packaging e incluso en la industria de los alimentos, de entre las aplicaciones más nombradas correspondientes al PET, es el envasado (Sousa et al., 2015, pp.113-141).

El PET se puede presentar en forma de polímero amorfo (transparente) o semicristalino (opaco y blanco) dependiendo de su proceso de elaboración e historial térmico, el PET es perteneciente a la parentela de polímeros de poliéster mismas que destacan por su combinación notable de propiedades que proporcionan un equilibrio entre ellas, tales como: (1) Propiedades mecánicas, (2) Propiedades químicas, (3) Propiedades eléctricas, (4) Estabilidad dimensional, (4) Facilidad de manejo y por último (5) bajos costos de producción (Campbell, 2004, pp.339-438).

Entre las principales aplicaciones del PET, se ha utilizado para fabricar fibras, lámina y películas, específicamente se utiliza en el envasado de alimentos y bebidas, dispositivos electrónicos y de comunicación, piezas de automoción, artículos para el hogar, productos de iluminación, herramientas eléctricas, artículos deportivos, fotografía, láminas de rayos X, textiles y construcción (Shojaei et al., 2020, pp. 2912-2938).

#### 1.2.2.1. Estructura y morfología del PET



**Figura 1-1:** Estructura del Tereftalato de polietileno

Fuente: (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

El poli tereftalato de etileno está formado por una cadena principal, conformada por un grupo éster y un grupo etileno que se encuentran formando una cadena lineal unida a un grupo aromático, es importante tener en cuenta la estructura del PET ya que debido a la estructura es muy útil en la aplicación para fibras y películas (Mandal & Dey, 2019, p.1).

El politereftalato de etileno posee una estructura cristalina particular, el anillo aromático que se encuentra conectado con la cadena alifática adhiere características al polímero, como convertirlo

en una molécula rígida a diferencia de otros polímeros como las poliolefinas o las poliamidas (Alomoto & Elizabeth, 2014).

### 1.2.2.2. Propiedades físicas y químicas del PET

El PET, al ser un poliéster termoplástico se le atribuyen excelentes propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas, además de su buena resistencia química, transparencia, estabilidad dimensional y baja absorción de la humedad (Mandal & Dey, 2019).

**Tabla 3-1:** Propiedades del PET

<b>Propiedad</b>	<b>Descripción</b>
Temperatura de transición vítrea	Alrededor 67 °C
Densidad	PET cristalino 1,455 g/cm <sup>3</sup> PET amorfo 1,333 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusión	Cerca 265 °C
Resistencia a la tracción	53 MPa

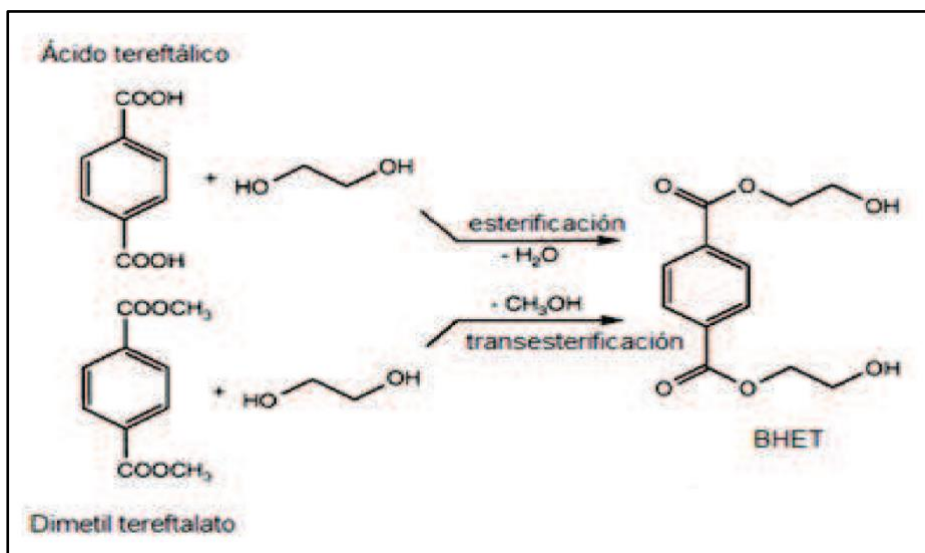
**Fuente:** (Sousa et al., 2015, p. 113).

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

### 1.2.2.3. Obtención del PET

La síntesis del PET esencialmente involucra cuatro etapas: (1) Transesterificación o esterificación directa (2) Prepolimerización (3) Policondensación (4) Policondensación en estado sólido.

La primera etapa se realiza para la obtención del producto intermedio (BHET), el proceso puede darse a través de dos vías: (1) Proceso de transesterificación, con dimetil tereftalato (DMT) y Etilenglicol (EG), eliminando metanol de forma continua, en condiciones de presión y temperatura de entre 140 - 220°C y 100 kPa; (2) Proceso de esterificación directa, con ácido tereftálico (TPA) y EG, eliminando agua en el proceso, en condiciones de presión y temperatura de 240 - 260°C y 300 - 500 kPa (Ravindranath & Mashelkar, 1986) , para acelerar el proceso de obtención se pueden emplear catalizadores afines como compuestos solubles de titanio, manganeso, germanio y acetatos de plomo, zinc, calcio y cadmio en cantidades que oscilan desde 0,05-0,5% de la masa total de la reacción (Alomoto & Elizabeth, 2014).



**Figura 2-1:** Obtención de BHET por esterificación y transesterificación  
 Fuente: (Alomoto & Elizabeth, 2014).

En la segunda etapa para la obtención del BHET, el BHET es obtenido, polimerizado en un reactor de prepolimerización hasta un grado de polimerización de 30, ésta etapa ocurre en condiciones de temperatura que varían desde 250°C hasta 280°C y con una presión desde 2 hasta 3 kPa además de una viscosidad correspondiente a un valor de 5 Pa.s (Ravindranath & Mashelkar, 1986, pp. 2197-2214). Los productos obtenidos de la primera y segunda etapa, pasan a la tercera fase, de policondensación donde el producto se polimeriza a un grado de polimerización de hasta 100, al vacío, a temperatura de 280 - 290°C y 50 - 100 Pa de presión y en condiciones severas de agitación con el objetivo de aumentar la viscosidad de la mezcla. La policondensación en estado sólido se realiza con el objetivo de incrementar el grado de polimerización hasta alcanzar valores mayores a 150, llevado a cabo sobre la temperatura de transición vítrea pero debajo de la temperatura de fusión del polímero, es decir de entre 200 - 240°C y 100 kPa de presión (Ravindranath & Mashelkar, 1986, pp. 2197-2214).

#### 1.2.2.4. Reciclaje del Poli Tereftalato de Etileno

El politereftalato de etileno al ser considerado uno de los plásticos que presenta mayores aptitudes para el reciclado, éste se puede reciclar por medio de diferentes técnicas. Dentro del reciclaje de polímeros se distinguen cuatro alternativas: (1) Reciclaje primario: Reextrusión (2) Reciclaje secundario: Mecánico (3) Reciclaje terciario: Químico, transformación en combustibles y materias primas petroquímicas (4) Reciclaje cuaternario: Recuperación energética, incineración en hornos y reactores (Nováková et al., 2017, p.239).

## Reciclaje Primario

El reciclaje primario, también conocido como reciclaje de circuito cerrado, en éste tipo de reciclaje, el material a reciclarse, se recicla con el objetivo de formar productos con características y propiedades del producto anterior, éste tipo de reciclaje tiene lugar en los plásticos pre-consumo y post-consumo, el procedimiento se basa principalmente en cuatro etapas que involucran: (1) Separación, visual del color, forma o tamaño del material y también separados por medio de propiedades como la densidad del material (2) Granulado, por medio de procesos industriales (3) Limpieza y (4) Pellets (Nováková et al., 2017, p. 239).

**Tabla 4-1:** Tecnologías de reciclaje primario

Tecnología	Tratamiento
Reciclaje mecánico de circuito cerrado	Ésta forma de reciclaje mecánico constituye el reciclaje mecánico de plásticos puros, aquellos que no se mezclan con otros materiales.
Disolución de polímeros con dos disolventes	Se basa en la disolución del polímero con un disolvente específico que varía según el tipo de polímero y se limpia de una posible contaminación, se utiliza un codisolvente para separar el polímero y recuperar el disolvente usado. El polímero es recuperado y granulado nuevamente.

**Fuente:** (Nováková et al., 2017, p. 239).

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

## Reciclaje Secundario

Nováková et al., (2017) afirma que, en el reciclaje secundario o también conocido como reciclaje de circuito abierto, el producto del reciclaje secundario son materiales reciclados (mixtos) con propiedades inferiores al producto virgen, es decir éste material no sustituye al material original. El proceso de reciclaje secundario omite la etapa 1 y 2 del reciclaje primario, y en su lugar se mezclan todo material incluido tapas y agentes contaminantes dentro de un extrusor, una de las desventajas que presenta éste tipo de reciclado es que cuando los polímeros plásticos son recolectados, éstos poseen grandes cantidades de sustancias contaminantes por lo que después del reciclado, se obtiene un reciclado mixto con propiedades materiales inferiores (Schwarz et al., 2021, pp. 331-342).

## Reciclaje Terciario

El reciclaje terciario es un método de reciclaje que sigue con los principios del desarrollo sostenible, se basa principalmente en la misma metodología que sigue el reciclaje mecánico hasta

el corte en forma de gránulos, luego el material es tratado con productos químicos específicos para la producción de monómeros, oligómeros y sus mezclas (dímeros, trímeros, etc) como el Bis-(2-hidroxiethyl) tereftalato (BHET), ácido tereftálico (TPA), glicoles, dimetil tereftalato (DMT), productos químicos o combustibles, líquidos y gases de petróleo (Raheem et al., 2019). El reciclaje terciario o reciclaje químico se realiza con el objetivo de recuperar los componentes petroquímicos del polímero para poder ser reutilizados en la fabricación de plástico o también para la fabricación de productos químicos sintéticos (Hopewell et al., 2009, pp. 2115-2126)

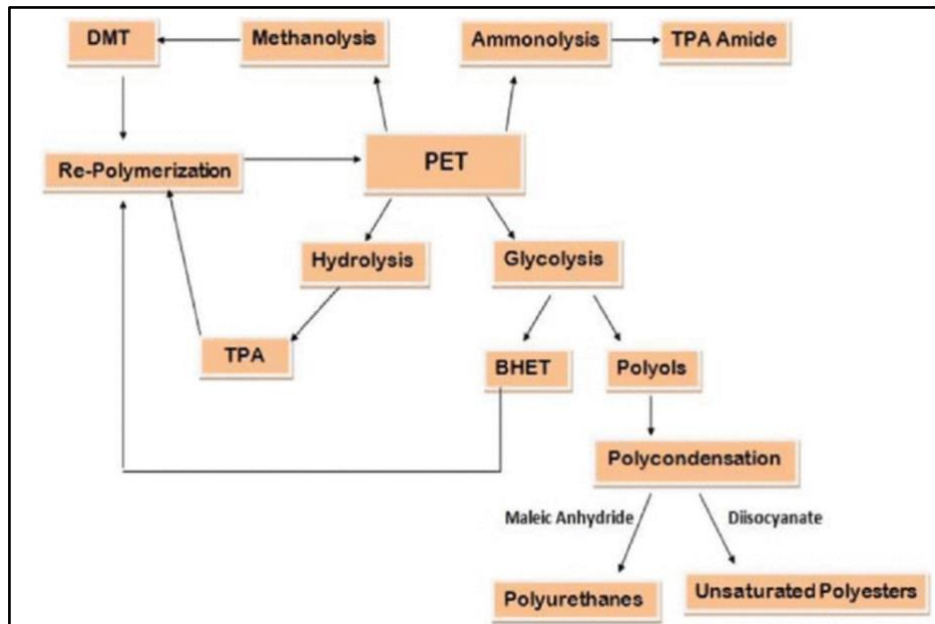
Este tipo de reciclaje se logra a través de mecanismos de solvólisis asociado a la degradación por disolventes o también por pirólisis que es la degradación del material por medio de calor en ausencia de oxígeno, aire o en vacío.

**Tabla 5-1:** Tecnologías de reciclaje terciario

<b>Tecnología</b>	<b>Tratamiento</b>
Gasificación de materias primas	Dicha tecnología de reciclaje químico se asemeja a una gasificación a alta temperatura. Para esta tecnología, el polímero es utilizado como combustible derivado de desechos y es transformado en un gas de síntesis con relación molar $H_2/CO$ de 2:1. La cantidad de gas de síntesis y las emisiones de $CO_2$ dependen del tipo de polímero.
Pirólisis de materias primas	Para la tecnología de reciclaje químico de pirólisis de materias primas, el polímero es usado como combustible derivado de desechos y se convierte en aceite de pirólisis equivalente al diésel, su contenido energético depende del poder calorífico del polímero tratado.
Pirólisis a productos de cera	El polímero es utilizado para la obtención de cadenas de hidrocarburos ( $C_{10} - C_{14}$ ) con el objetivo de sustituir las ceras similares a la parafina y potencialmente, los aceites lubricantes.
Reciclaje termoquímico a monómeros mediante gasificación	El polímero se gasifica de temperatura media-alta, obteniéndose un gas con una mezcla de BTX, monómeros y moléculas cortas de carbono ( $C_2 - C_5$ )
Reciclaje termoquímico a monómeros mediante pirólisis	El polímero es pirolizado a temperatura media obteniéndose aceite con una mezcla de BTX y moléculas cortas de carbono.

Fuente: (Nováková et al., 2017, p. 239).

Realizado por: Alvarado, M. 2021.



**Figura 3-1:** Esquema reciclaje químico del PET  
 Fuente: (Nováková et al., 2017, p. 239).

### Reciclaje Cuaternario

Dentro de la alternativa de reciclaje, como lo es el reciclaje cuaternario, el material a reciclarse es incinerado totalmente, el objetivo de dicha técnica es el aprovechamiento de su alto poder calorífico del plástico para recuperar energía en forma de calor y electricidad, tomando en cuenta que el PET posee un poder calorífico de 23 MJ/kg (Nováková et al., 2017, p. 239).

La incineración de residuos plásticos es una alternativa utilizada cuando las rutas de reciclaje restantes son extenuantes y los desechos son peligrosos de manipular, una de las desventajas que presenta el método de incineración es su alto grado de toxicidad para la salud debido a las sustancias tóxicas transmitidas por el aire como los ésteres de antimonio y ftalato, además de las dioxinas que provienen de los polímeros que contienen cloro (Raheem et al., 2019, pp. 1052-1064).

#### 1.2.3. Reciclaje Químico del PET

El reciclaje químico o también conocido como quimiólisis de PET consiste en la descomposición de polímeros por agentes químicos y catalizadores con el objetivo de obtener moléculas que se originaron con ellos y posteriormente su aplicación en diversos productos, es una alternativa viable para gestión y manejo de residuos de PET ya que permite la reducción del uso de productos petroquímicos minimizando emisiones de gases (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

El reciclaje químico puede darse por medio de dos vías (1) Solvólisis o (2) Pirólisis. La solvólisis es aquella que implica la degradación por la acción de disolventes mientras que la pirólisis implica la degradación del material por acción del calor en ausencia de oxígeno o al vacío, por

solvólisis y dependiendo del agente utilizado en la reacción, el reciclaje químico puede darse por varias vías, de entre ellas, las más comunes: (1) Metanólisis; (2) Glucólisis; (3) Hidrólisis; (4) Aminólisis; (5) Amonólisis (Al-Sabagh et al., 2016, pp. 364-377).



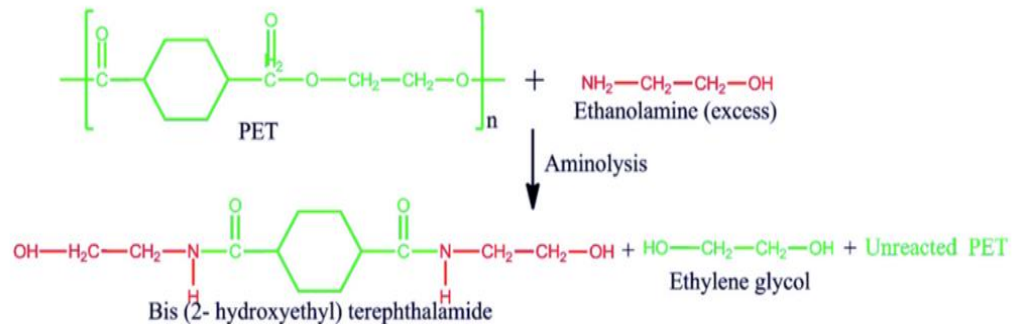
**Tabla 6-1:** Métodos de degradación química del PET

Método	Agentes solvólicos	Monómeros	Reacción
Metanólisis	Metanol	Tereftalato de dimetilo (DMT) Etilenglicol (EG)	
Glucólisis	Etilenglicol Dietilenglicol Propilenglicol Trietilenglicol	Tereftalato de bis (2-hidroxietilo) BHET.	
Hidrólisis	Alcalina: $H_2O$ ; $NaOH$ Ácida: $H_2O$ ; $H_2SO_4$ ; $HNO_3$ Neutra: $H_2O$	Ácido Tereftálico (TPA) Etilenglicol (EG)	

Aminólisis

Aminas  
Poliaminas

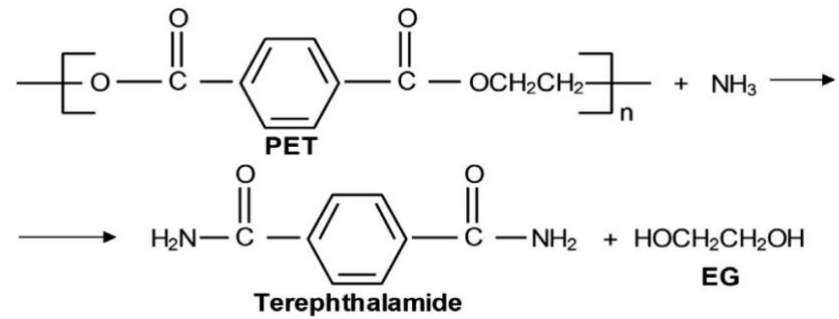
Mono y di aminos de  
ácido tereftálico  
(TPA)  
Etilenglicol (EG)



Amonólisis

Amoniaco NH<sub>3</sub>

Monómeros  
Tereftalamida



Fuente: (Raheem et al., 2019, pp. 1052-1064).

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

#### ***1.2.4. Glucólisis de PET***

El reciclaje químico o despolimerización del politereftalato de etileno a través de la técnica de Glucólisis es un tipo de reacción de solvólisis por acción de un glicol, Etilenglicol, Propilenglicol, trietilenglicol, entre otros glicoles, ésta reacción químicamente se define como la degradación molecular del polímero Politereftalato de etileno por la acción de glicoles comúnmente etilenglicol (EG) (Shojaei et al., 2020, pp. 2912-2938).

La transformación del dímero en monómero BHET es un proceso reversible de acuerdo a la reacción, ésta se da en presencia de catalizadores de transesterificación, donde los enlaces éster se rompen y se reemplazan con terminales hidroxilo, obteniéndose como producto principal el monómero bis (2-hidroxietil) tereftalato (BHET) (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

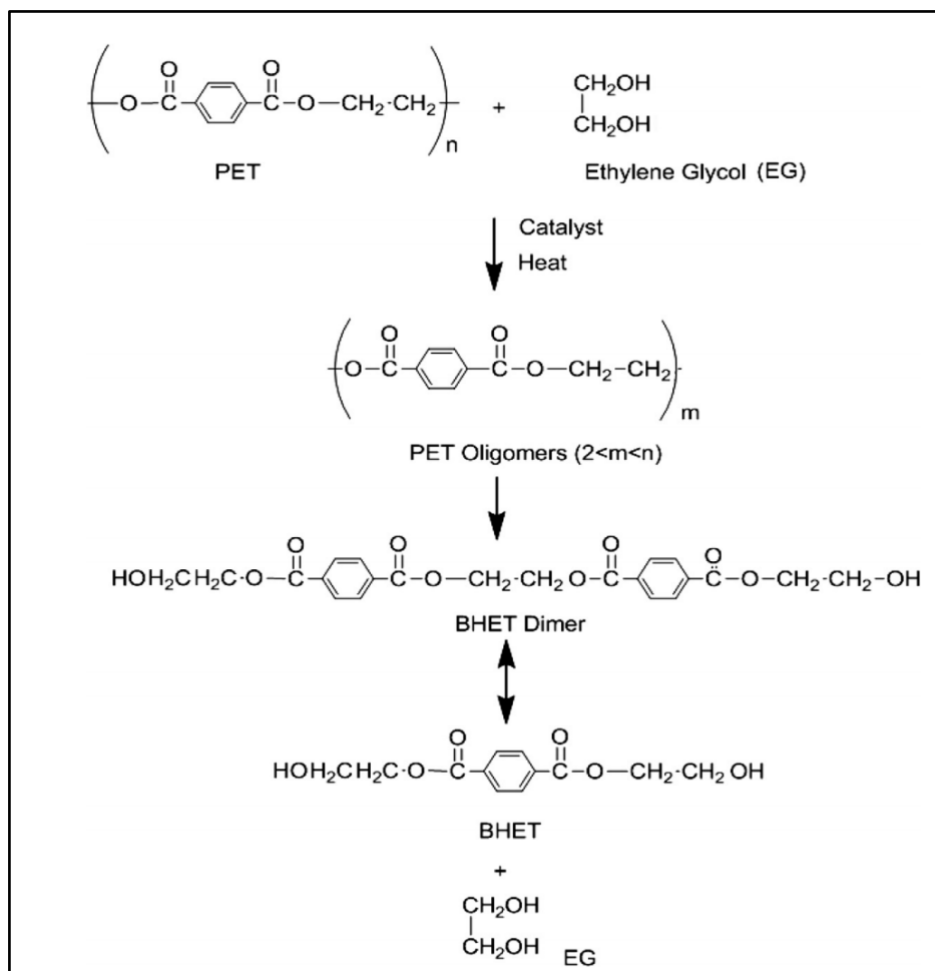
La velocidad de la reacción de glucólisis depende de varios parámetros que incluyen, la temperatura, relación PET/EG misma que generalmente se utiliza una relación 1:2 o 1:3, el tipo y la cantidad de catalizador, el tamaño de partícula, ésta influye de manera significativa en el desarrollo del proceso debido a que un tamaño de partícula más pequeño conduce a una mejor descomposición del PET atribuida a una mayor área de superficie, el tamaño de partícula adecuada para la degradación se ubica en partículas con dimensiones de entre 0,25 a 0,35 mm (Sangalang et al., 2015, pp.45-53).

Es importante mencionar que prolongar la reacción después de que se alcance el equilibrio de los dos hará que la reacción se desplace hacia atrás, es decir aumentando la cantidad de dímero a expensas del monómero BHET, por lo que es extremadamente importante conocer muy bien las condiciones óptimas en que se puede dar la reacción de glucólisis de Poli Tereftalato de Etileno PET (Al-Sabagh et al., 2016, pp. 364-377).

El proceso de Glucólisis de PET implica 2 etapas:

Etapas 1: El carbono carbonilo del grupo éster del polímero es atacado por el par de electrones libres presente en el EG.

Etapas 2: El grupo hidroxil etilo de los enlaces EG con el carbono carbonilo del PET que rompe la cadena polimérica larga en oligómeros cortos con la formación subsiguiente de BHET (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).



**Figura 4-1:** Esquema de glucólisis de Poli tereftalato de Etileno  
Fuente: (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

### 1.2.5. Métodos de Glucólisis

#### 1.2.5.1. Glucólisis Catalizada

La glucólisis catalizada de PET es un método utilizado para aumentar la tasa de glucólisis de PET utilizando un catalizador, estudio cinéticos del proceso demuestran que sin el uso de un catalizador la reacción es extremadamente lenta, ésta puede durar hasta 8 horas, la energía de activación para la glucólisis no catalizada es de 32 kcal/mol, mientras que el proceso catalizado requiere sólo 19 kcal/mol obteniéndose una despolimerización casi completa (Langer et al., 2020<sup>o</sup>, pp. 127-171).

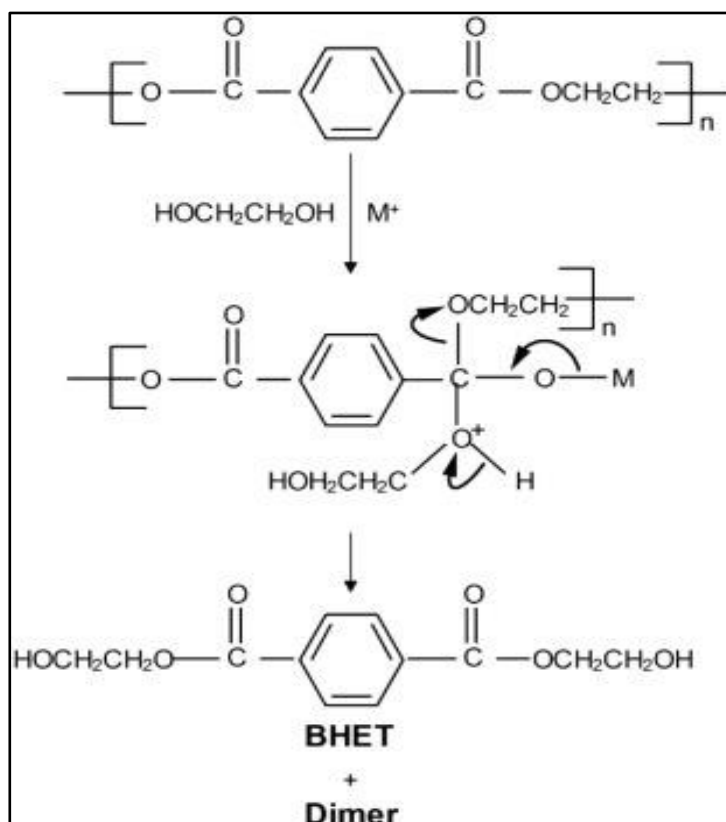
Los catalizadores conocidos como catalizadores de transesterificación a base de metales se utilizan comúnmente para acelerar la velocidad de reacción, facilitan el ataque del etilenglicol sobre el PET y forman complejos con el grupo carbonilo, lo que lleva a la formación de BHET (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

**Tabla 7-1:** Catalizadores de procesos de despolimerización glucólica

Tipo	Descripción
Derivados de metales	Acetatos metálicos (manganeso, zinc, plomo y cobalto) Carbonatos y Bicarbonatos de sodio Los catalizadores derivados de metales se obtiene una conversión glicólica casi completa de PET en condiciones de temperatura de 197°C en un tiempo de 90 min.
Zeolitas	La actividad catalítica de las zeolitas se debe a la presencia de sitios activos y área superficial en sus mesoporos y microporos. La zeolitas funcionan en condiciones de una temperatura por debajo de 245°C.
Líquidos iónicos	Son sales con puntos de fusión inferiores a 100°C, presentan características como estabilidad térmica, fuerte solvatación de compuestos orgánicos e inorgánicos, estabilidad electroquímica, no volatilidad y baja inflamabilidad.

Fuente: (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

Realizado por: Alvarado, M. 2021.



**Figura 5-1:** Mecanismo de reacción de Glucólisis catalizada por metales pesados

Fuente: (Al-Sabagh et al., 2016, pp. 364-377).

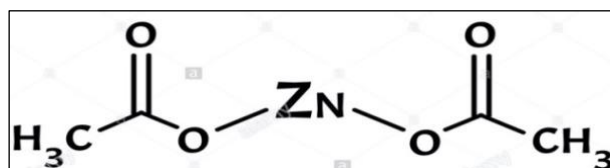
En los catalizadores a base de metales, el metal forma un complejo con el grupo carbonilo siguiendo el mecanismo de reacción de la figura 4-1.

Un par de electrones libres en el oxígeno del etilenglicol inicia la reacción atacando el carbono carbonilo del grupo éster del poliéster. El grupo hidroxietilo del etilenglicol luego forma un enlace con el carbono carbonilo del poliéster rompiendo la cadena larga en oligómeros de cadena corta y finalmente BHET, como se ilustra en la figura 4 (Al-Sabagh et al., 2016, pp. 364-377).

### 1.2.6. Catalizadores a base de metales

#### Acetato de Zinc

El acetato de zinc forma parte de los derivados de metales que se utilizan como catalizadores para la reacción de glucólisis de poli tereftalato de etileno (PET), es un compuesto que se presenta como cristales incoloros o como un fino polvo de color blanco, éste es preparado por medio de la acción del ácido acético sobre el carbonato de zinc o zinc metálico siendo libremente soluble en agua y en etanol (Bohuis et al., 2015, p. ).



**Figura 6-1:** Estructura química del Acetato de zinc  
Fuente: (Johnson et al., 1981, pp. 899-904).

**Tabla 8-1:** Propiedades físicas del Acetato de Zinc

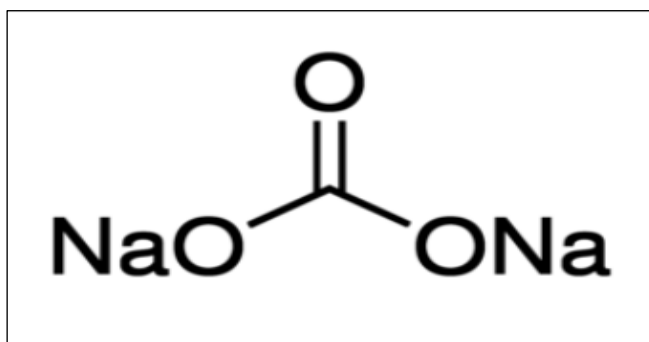
Propiedad	Especificación
Número de registro CAS	5970-45-6
Fórmula química	$C_4H_6O_4Zn$
Peso molecular (g/mol)	219.427
Sistema cristalino	Monocíclico
Punto de congelación	510 K
Punto de fusión	327°C
Densidad	1.735 g/cm <sup>3</sup>

Fuente: (Bohuis et al., 2015).

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

## Carbonato de sodio

El carbonato de sodio es una sal que se presenta como cristales incoloros o a su vez como un polvo granular color blanco, una de las características que posee dicha sal anhidra es que se trata de una sal higroscópica, no corrosiva y no tóxica (Convención Farmacopea USA, 2018).



**Figura 7-1:** Estructura química del Carbonato de sodio  
Fuente: (Convención Farmacopea USA, 2018).

**Tabla 9-1:** Propiedades físicas del carbonato de sodio

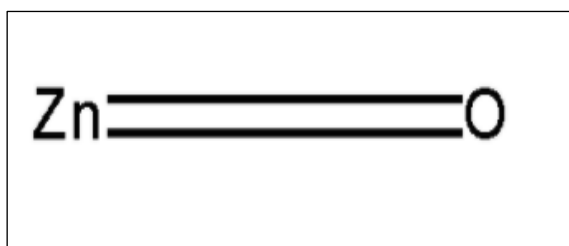
Propiedad	Especificación
Número de registro CAS	497-19-8
Fórmula química	$\text{Na}_2\text{CO}_3$
Peso molecular (g/mol)	105.9
Punto de ebullición	1600 °C
Punto de fusión	851 °C
Densidad	2,54 g/cm <sup>3</sup>

Fuente: (Convención Farmacopea USA, 2018).

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

## Óxido de Zinc

El óxido de zinc es un compuesto inorgánico perteneciente a los óxidos metálicos, se forma por un método denominado sol-gel con la utilización de acetato de zinc e hidróxido de sodio con etanol como solvente, la sustancia se compone de 55,38% en zinc y 44,62% de contenido de oxígeno (Bhargava, cereza, 2020)



**Figura 8-1:** Estructura química del Óxido de zinc  
**Fuente:** (Bhargava, cereza, 2020).

**Tabla 10-1:** Propiedades físicas del Óxido de zinc

Propiedad	Especificación
Número de registro CAS	1314-13-2
Fórmula química	ZnO
Peso molecular (g/mol)	81,408 g/mol
Punto de ebullición	1975 <sup>0</sup> C
Densidad	5,606 g/cm <sup>3</sup>

**Fuente:** (Bhargava, cereza, 2020).

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

#### 1.2.6.1. Glucólisis asistida por solventes

La glucólisis asistida por solventes es un método de glucólisis que implica la despolimerización de PET con EG en presencia de otro solvente como medio de reacción el solvente más utilizado es el Xileno, los solventes como el Xileno proporcionan una capacidad de mezcla, a la mezcla de glicol/PET, mejorando la conversión y rendimiento de BHET (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

#### 1.2.6.2. Glucólisis Supercrítica

La glucólisis supercrítica se trata de la degradación de PET con la acción del etilenglicol en condiciones de temperatura y presión que superan las condiciones del punto crítico del etilenglicol, temperatura de 446,7°C y presión de 8,2 MPa.

Los fluidos supercríticos en la reacción erradica la necesidad de usar un catalizador para hacer que el proceso sea ambientalmente preferible, además, dicha metodología también suprime el rendimiento de subproductos proporcionando un rendimiento muy alto de BHET (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

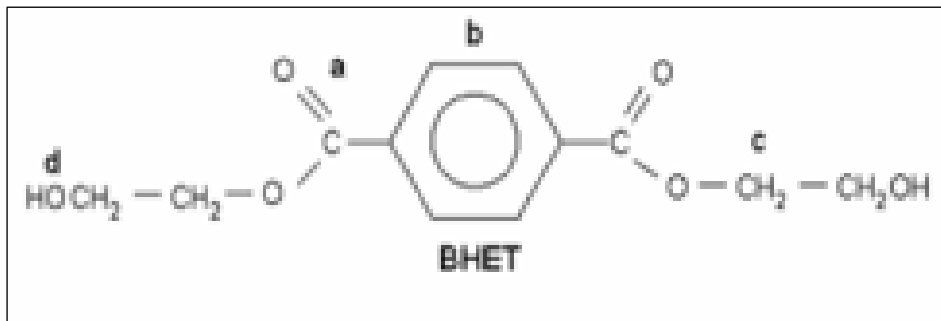


### 1.2.6.3. Glucólisis asistida por microondas

La radiación de microondas se utiliza como una metodología apta para reducir considerablemente el tiempo de reacción de la glucólisis, de 8 horas a 35 min sin influir en el rendimiento del monómero obtenido (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

### 1.2.6.4. Bis (2-hidroxietil) tereftalato (BHET)

El bis (2-hidroxietil) tereftalato también conocido como (BHET) es el producto principal de la reacción de despolimerización del politereftalato de etileno (PET) tratado con etilenglicol, en la figura 9-1 se puede observar la estructura de la molécula de BHET.



**Figura 9-1:** Estructura del BHET

Fuente: (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

### 1.2.7. Aplicaciones del producto glucolizado BHET

Los productos de reacción de glucólisis de PET pueden ser utilizados en un amplio campo de aplicaciones de entre las principales destaca, la producción de revestimientos de poliuretano, es decir artículos como espumas de poliuretano, como plastificante en resinas de poliéster insaturado, resina epoxi, hormigón polimérico, poliuretanos rígidos o flexibles (Palhano Zanela et al., 2018), además de copoliésteres, tintes hidrófobos insaturados, resinas y revestimientos acrílicos, una de las principales aplicaciones es la de utilizarse para la producción de PET virgen en una planta de PET convencional (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1. Objetivos

##### 2.1.1. *Objetivo General*

Determinar de la influencia del tipo de catalizador en el rendimiento de reacción de glucólisis de Poli Tereftalato de Etileno post-consumo para la obtención de Bis (2- hidroxietileno) (BHET).

##### 2.1.2. *Objetivos Específicos*

- Definir las variables del proceso de glucólisis de Polietilen Tereftalato post-consumo modificando la temperatura de reacción.
- Evaluar las características y propiedades del tipo de catalizador óptimo a partir de métodos experimentales.
- Caracterizar el producto obtenido por medio de técnicas de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier.

#### 2.2. Hipótesis y especificación de variables

##### 2.2.1. *Hipótesis General*

La determinación del tipo de catalizador en la reacción de glucólisis se puede realizar a partir de muestras de Poli Tereftalato de Etileno post-consumo estimando el porcentaje de rendimiento en la reacción.

##### 2.2.2. *Hipótesis Específicas*

**H1:** La temperatura del proceso, es una de las variables que ayudan a definir las condiciones de operación dentro del proceso de glucólisis de PET post-consumo.

**H2:** Los tipos de catalizadores como derivados de metales afectan significativamente en la conversión y rendimiento de la reacción de Glucólisis de PET

**H3:** La caracterización del producto obtenido BHET a partir de técnicas de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, permite identificar los grupos funcionales correspondientes a la estructura del producto validando así el experimento.

### 2.2.3. Identificación de Variables

**Tabla 1-2:** Identificación de variables que intervienen en el proceso de glucólisis

<b>Etapas del proceso</b>	<b>Variables Independientes</b>	<b>Variables Dependientes</b>
Caracterización de las muestras de plástico PET	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad de muestra</li> <li>• Tamaño de partícula</li> <li>• Tipo de plástico</li> </ul>	--
Desarrollo del proceso de glucólisis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de catalizador</li> <li>• Concentración del catalizador</li> <li>• Temperatura de degradación</li> <li>• Tiempo de degradación del plástico</li> </ul>	--
Fin del proceso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen del agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendimiento total de la reacción.</li> </ul>
Análisis BHET	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Masa-Fracción sólida</li> </ul>	--

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

#### 2.2.4. Operacionalización de Variables

**Tabla 2-2:** Racionalización de las variables que intervienen en el proceso de Glucólisis de PET

Variable	Tipo de variable	Definición operacional	Categorización	Indicadores	Instrumento de medición	Valor
Cantidad de muestra	Independiente, cuantitativa, unidimensional, continua	Ración significativa del material a utilizar, manifiesta la magnitud de una propiedad medible.	--	Peso	Balanza analítica	4 g
Tamaño de partícula	Independiente, unidimensional, continua	Se trata de la dimensión física de cualquier objeto.	--	Diámetro de partícula	de Calibrador	0,25 a 0,35 mm
PET post-consumo	Independiente, cualitativo, continua, multidimensional	Polímero termoplástico amorfo (transparente) obtenido por esterificación o transesterificación.	--	Composición química	Espectrofotómer o Infrarrojo	--
Tipo de catalizador	Independiente, continua, multidimensional.	Sustancia que aceleran la reacción al disminuyendo la energía de activación.		Densidad	Métodos experimentales	1.333 g/cm <sup>3</sup>
Cantidad del catalizador	Independiente, multidimensional continua	Cantidad en que se encuentran las sustancias que se disuelven en relación a la o las sustancias que lo disuelven.	Metales pesados	Peso	Registro CAS	--

Temperatura de degradación	Independiente, unidimensional, continua	Magnitud física que mide la cantidad de calor o energía térmica de un sistema.	Temperatura máxima de degradación	Medida del instrumento	Termómetro	180 -190°C
Tiempo de degradación del plástico	Independiente, multidimensional continua	Magnitud empleada para realizar de lo dura algo susceptible al cambio	Tiempo de degradación	Horas	Cronómetro	2,5 h
Volumen del agua	Independiente, multidimensional continua	Magnitud métrica que define la extensión en tres dimensiones de una región del espacio.	--	--	Probeta	100 mL
Rendimiento total de la reacción	Dependiente, unidimensional, continua	Cantidad de producto obtenido en la reacción, expresado en porcentaje.	--	Peso	Balance de materia	80-100%

---

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

### 2.2.5. Matriz de Consistencia

**Tabla 3-2:** Matriz de consistencia para el trabajo de investigación

<i>Aspectos Generales</i>				
<b>Problema General</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis General</b>		
El uso extremo de producto plásticos en el escenario actual genera un intenso interés en el reciclaje y reutilización de productos finales poniendo en práctica técnicas de reciclaje químico como la glucólisis de Poli tereftalato de Etileno	Determinar de la influencia del tipo de catalizador en el rendimiento de reacción de glucólisis de Poli Tereftalato de Etileno post-consumo para la obtención de Bis (2-hidroxi-etileno) (BHET)	La determinación del tipo de catalizador en la reacción de glucólisis se puede realizar a partir de muestras de Poli Tereftalato de Etileno post-consumo estimando el porcentaje de rendimiento en la reacción.		
<i>Aspectos Específicos</i>				
<b>Problemas Específicos</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Hipótesis Específicas</b>	<b>Variables de las hipótesis específicas</b>	<b>Técnicas de recolección de datos</b>
Se desconoce las variables de operación generales del proceso	Definir las variables del proceso de glucólisis de Poli Tereftalato de Etileno post-consumo modificando la temperatura y cantidad de catalizador.	La temperatura es una de las variables que ayudan a definir las condiciones de operación del proceso de glucólisis de PET post-consumo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de degradación</li> <li>• Concentración del catalizador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayos de glucólisis a diferentes temperaturas (180°C -190°C)</li> <li>• Ensayos de glucólisis con diferentes concentraciones de catalizador de entre 0,004-0,008 g.</li> <li>• Bibliografía complementaria</li> </ul>

<p>El rendimiento de la reacción difiere con la utilización de diferentes tipos de catalizador.</p>	<p>Evaluar las características y propiedades del tipo de catalizador óptimo a partir de métodos experimentales</p>	<p>Los tipos de catalizadores como derivados de metales afectan significativamente en la conversión y rendimiento de la reacción de Glucólisis de PET</p>	<p>• Tipo de catalizador. • Tiempo de degradación del plástico.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamientos de glucólisis con 3 diferentes catalizadores.</li> <li>• Registro CAS</li> </ul>
<p>Desconocimiento de la composición de las muestras de producto obtenido</p>	<p>Caracterizar el producto obtenido por medio de técnicas de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier.</p>	<p>La caracterización del producto obtenido BHET a partir de técnicas de Espectroscopía IR permite identificar los grupos funcionales correspondientes a la estructura del producto validando el experimento.</p>	<p>• Masa-fracción sólida • Rendimiento total de la reacción</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balance de materia en el proceso.</li> <li>• Identificación de grupos funcionales en el espectrofómetro IR.</li> <li>• Análisis de resultados</li> <li>• Bibliografía complementaria</li> </ul>

---

Realizado por: Alvarado, M. 2020.

## **2.3. Tipo y Diseño de Investigación**

### **2.3.1. Tipo de investigación**

El presente trabajo de investigación “Determinación de la Influencia del Tipo de catalizador en el rendimiento de la reacción de glucólisis de Poli Tereftalato de Etileno post-consumo” es de tipo exploratoria debido al énfasis realizado en el análisis, investigación e interpretación de aspectos característicos y datos obtenidos para el desarrollo de metodologías innovadoras y fáciles de realizar obteniendo así la despolimerización de PET en Bis (2-hidroxietil-tereftalato)

## **2.4. Método de investigación**

### **a. Método Inductivo**

El método inductivo hace hincapié en los supuestos, conclusiones y razonamientos correspondientes a la investigación, a partir de técnicas de observación y análisis de diversos casos de estudio. La investigación se desarrollará a partir de la recopilación bibliográfica sobre técnicas de Glucólisis empleando diferentes catalizadores realizados a nivel internacional para el reciclaje químico del Poli Tereftalato de Etileno (PET).

### **b. Método Deductivo**

Con la utilización del método deductivo se pretende buscar una metodología para el tratamiento del plástico PET por medio del proceso de Glucólisis catalizada, como una alternativa para disminuir la cantidad de residuos generados. Se realiza tomando en cuenta los resultados obtenidos en base al rendimiento de la reacción, identificando así los parámetros más adecuados para la implementación del método de reciclaje terciario como solución de gran parte de la problemática de acumulación de residuos plásticos.

## **2.5. Diseño experimental de la investigación**

El diseño experimental del proyecto de investigación está desarrollado en base a los objetivos de obtención de BHET a partir de la Glucólisis catalizada de PET post-consumo.

Se realizó un diseño factorial de dos niveles con un punto central utilizado para verificar la influencia del tipo y cantidad de catalizador, como parámetros de entrada y sus efectos sobre el rendimiento de BHET (variable de respuesta).



Las pruebas experimentales realizadas se centran en la interacción de los diferentes parámetros estudiados para la evaluación del método del que resulten mejores rendimientos de reacción.

Para el alcance del objetivo general, el diseño experimental se ejecuta en base a tres diferentes etapas.

#### **a. Etapa Inicial**

La primera etapa se enfoca en la caracterización de las muestras de residuos PET recolectados, por medio de ensayos de densidad, pruebas de calentamiento y a partir de la utilización de técnicas de espectroscopia de Infrarrojos por Transformada de Fourier (FT-IR)

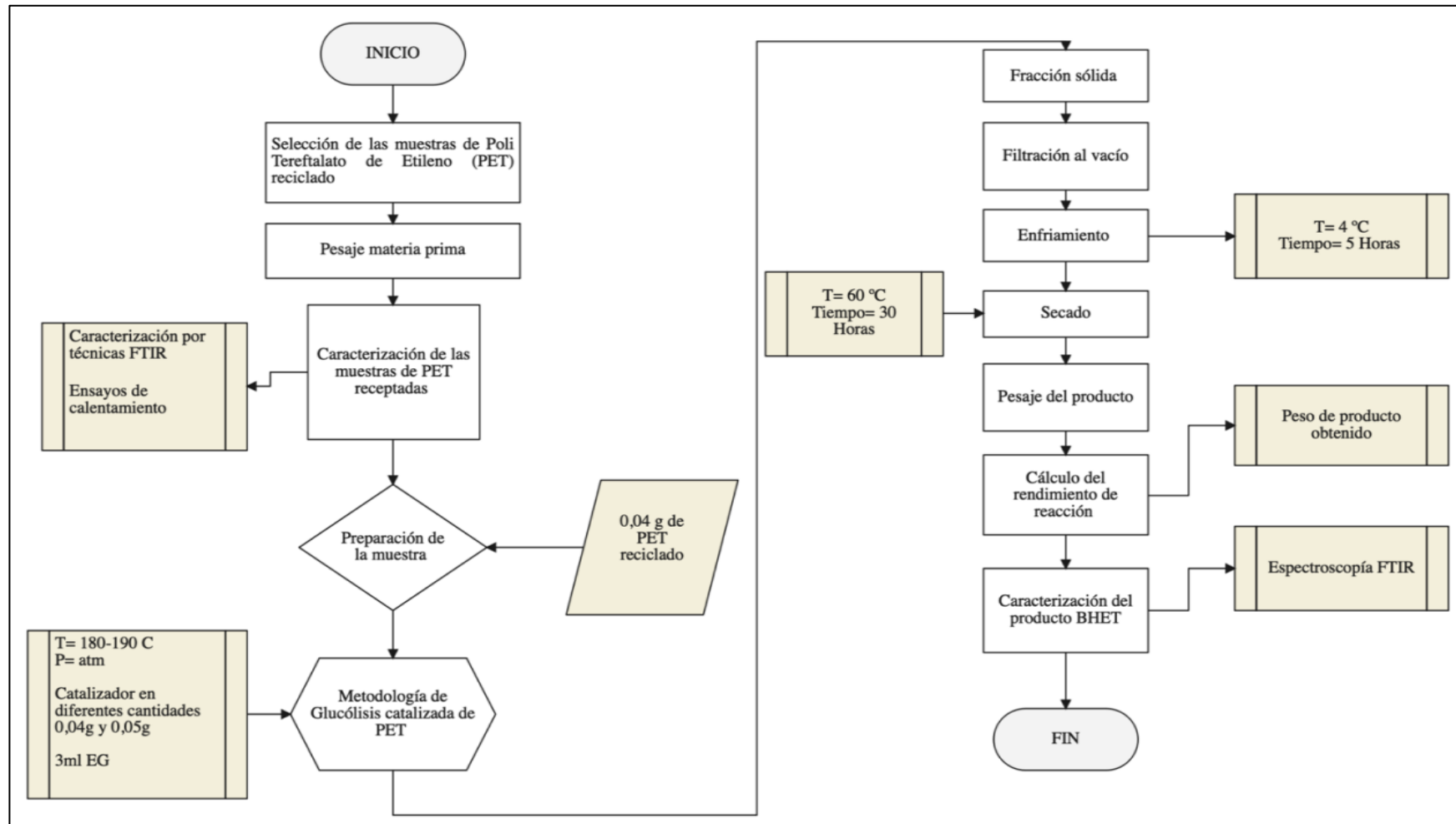
#### **b. Segunda etapa**

Dentro de la etapa intermedia se realizan los respectivos ensayos experimentales de Glucólisis catalizada, asistida por tres diferentes sustancias que son Óxido de Zinc, Acetato de Zinc y Carbonato de sodio anhidro, a diferente relación PET/Catalizador manteniendo constantes la temperatura, tiempo y relación PE/EG.

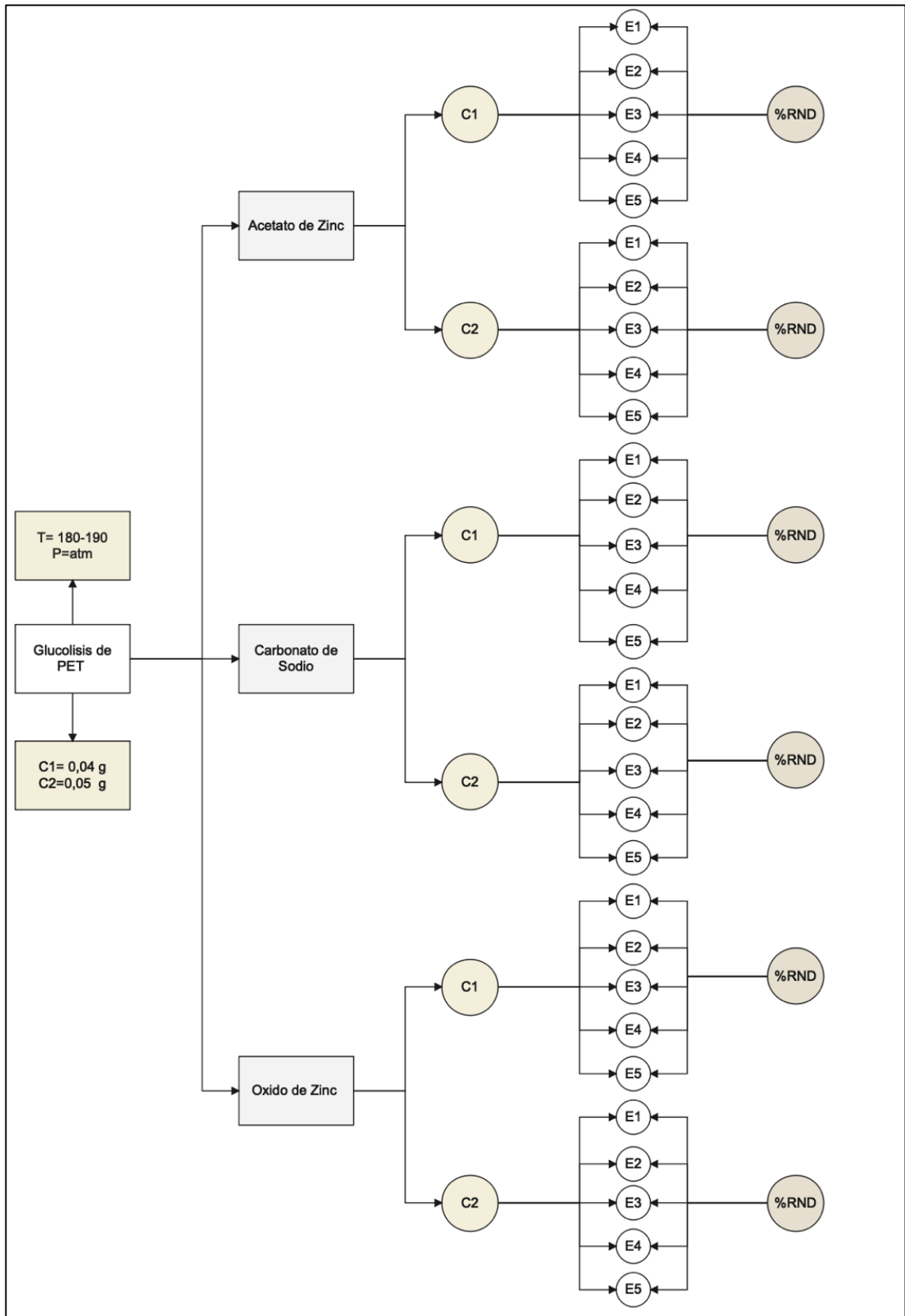
#### **c. Etapa Final**

La tercera etapa consiste en la caracterización de las muestras obtenidas mediante FT-IR y la evaluación del rendimiento de reacción obtenido en cada uno de los ensayos realizados de manera experimental.

De manera general en la figura 1-2, se ilustra un esquema acerca del proceso metodológico que se debe seguirse en base a cada una de las etapas del presente trabajo de investigación.



**Figura 1-2:** Diagrama de flujo del proceso de Glucólisis de PET  
 Realizado por: Alvarado, M. 2021.



**Figura 2-2:** Diseño experimental del proyecto de investigación, Glucólisis de PET  
 Realizado por: Alvarado, M. 2021.

## **2.6. Unidad de Análisis**

La unidad de análisis en el que se centra el presente trabajo de investigación es el termoplástico Poli tereftalato de Etileno (PET) post-consumo, mismo que inicialmente será caracterizado por medio de pruebas de densidad y espectroscopía FTIR

Posteriormente, entrará al proceso de despolimerización del PET post-consumo dando lugar a la formación del monómero BHET. Una vez obtenido el producto se realizarán pruebas de espectroscopía por Transformada de Fourier para su caracterización.

## **2.7. Población de Estudio**

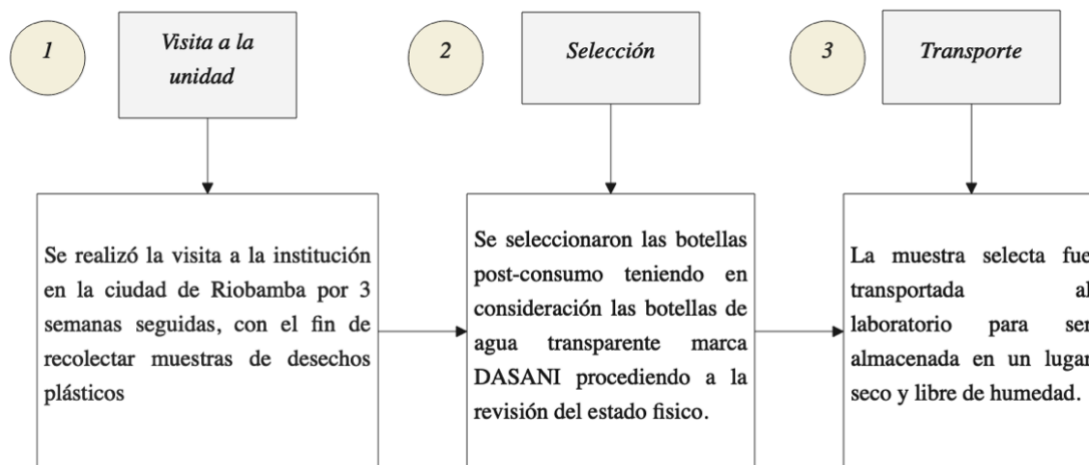
La población de estudio se la realiza al azar, las muestras de plástico PET post-consumo se recolectan dentro de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por 3 semanas obteniéndose la mayor cantidad posible considerando muestras de diferente color, tamaño y marca tomando en cuenta las botellas de marca DASANI.

## **2.8. Tamaño de Muestra**

Para la determinación del tamaño de muestra, se tomará un valor experimental de 4g de Poli Tereftalato de Etileno (PET) para cada tratamiento de Glucólisis catalizada, adquirido en el lapso de 3 semanas, en el proyecto de investigación se estima realizar 30 tratamientos, para lo cual es necesaria la disposición de 120g (0,12kg) de plástico PET, teniendo en cuenta el volumen del reactor de vidrio.

## **2.9. Selección de muestra**

La selección de la muestra de PET post-consumo se llevará a cabo mediante el esquema presentado en la figura 3-2.



**Figura 3-2:** Selección de la materia prima de PET post-consumo  
 Realizado por: Alvarado, M. 2021.

## 2.10. Técnicas de recolección de datos

La metodología propuesta y caracterización de las muestras (materia prima y productos obtenidos) para el proceso de Glucólisis catalizada de PET post-consumo se llevará a cabo haciendo el uso de las instalaciones dentro de:

- Laboratorio de Química Analítica
- Laboratorio de Análisis Instrumental

Mismos que se encuentran dentro de la Facultad de Ciencias en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ubicada en la Panamericana Sur km 1½, perteneciente a la ciudad de Riobamba. La recolección de datos se realizará a través de ensayos o tratamientos con su respectivo análisis, mismo que fue verificado y complementado con la revisión bibliográfica en artículos científicos, proyectos de investigación y trabajos de titulación relacionados al tema de investigación.

### a. Técnicas de caracterización

Las técnicas de caracterización se refieren a procedimientos de tipo científico que permiten analizar y del cual se obtiene información concreta acerca de diversas características de sustancias, naturaleza, composición química, entre otras.

## **b. Caracterización de la muestra de PET reciclado**

La materia prima utilizada en el proceso de Glucólisis catalizada, se trata de muestras de poli tereftalato de Etileno reciclado y recolectado dentro del establecimiento de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en la ciudad de Riobamba, para su caracterización se realizarán ensayos de densidad, pruebas de calentamiento y caracterización por FT-IR.

### **2.10.1. Caracterización de la materia prima**

#### **a. Tipo de plástico**

Para dar paso a la caracterización de la materia prima utilizada en la investigación fue necesaria la verificación del plástico y su numeración correspondiente acorde a la tabla 2-1, para su clasificación según los grandes grupos.

#### **b. Ensayo de densidad en polímeros**

La densidad es una propiedad comúnmente utilizada para materiales poliméricos, mismos que dan como resultado la identificación de los polímeros cuando se encuentran en su estado puro, se puede llegar a un valor relativo de densidad de la muestra tomando como referencia la densidad del agua, la muestra al hundirse o flotar en la misma indicando si la densidad de la muestra es mayor o menor que  $1\text{ g/cm}^3$  (Canevarolo, 2020, pp. 281-336).

**Tabla 4-2:** Densidades de los diferentes polímeros

<b>Polímero</b>	<b>Densidad (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b>
Polietileno (PE)	0,912 - 0,975
Polipropileno (PP)	$\cong 0,9$
Poliestireno (PS)	1,05
Politereftalato de etileno (PET)	1,34 - 1,39

**Fuente:** (Canevarolo, 2020, pp. 281-336).

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

#### **c. Ensayo de calentamiento**

Para la identificación de polímeros también se realiza el ensayo de calentamiento, mismo que consiste en calentar suavemente la muestra con la ayuda de un mechero hasta su ignición,

observando el color de la llama, facilidad para propagarse, olor, naturaleza del residuo y si es o no auto extingible (Canevarolo, 2020, pp. 281-336).

### 2.10.2. Metodología para la Identificación del PET

**Tabla 5-2:** Metodología utilizada para la caracterización de la materia prima

<b>Metodología para la caracterización de la materia prima</b>	
<b>Materiales y Equipos</b>	<b>Reactivos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaso de precipitación de 50 mL</li> <li>• Mechero Bunsen</li> <li>• Espátula</li> <li>• Alambre de cobre</li> <li>• Papel indicador de pH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra de Poli Tereftalato de Etileno reciclado</li> </ul>

#### **Procedimiento**

- Cortar trozos de PET reciclado de aproximadamente 1x1 cm y colocarlo en un vaso de precipitación con agua, verificar que la muestra se encuentre totalmente sumergida, es decir, sin burbujas adheridas a la misma, estimar la densidad del mismo si se hunde ( $\rho > 1g/cm^3$ ) o si la muestra de pellet flota ( $\rho < 1g/cm^3$ )
- A la espátula, calentarla sobre la llama del mechero con el objetivo de eliminar toda la materia orgánica, agregar la muestra sobre la espátula previamente enfriada y exponerlo a la llama lentamente, observar los cambios en su forma y coloración hasta lograr la fusión
- Acercar la muestra cuidadosamente sobre la llama del mechero Bunsen o alcohol, con mayor intensidad que en el paso anterior y posteriormente calentar la muestra hasta observar la llama.
- Poner en contacto la muestra con la llama nuevamente observando la facilidad con la que se enciende el polímero, retirar la muestra del mechero y observar el color de la llama que produce el polímero mientras se mantiene alejada de la llama.
- Observar e identificar si la llama se extingue de forma natural denotando así un material auto extingible o no.

**Fuente:** (Canevarolo, 2020, pp. 281-336).

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

Cada uno de los ensayos de caracterización y reconocimiento de la muestra de plástico a través de su comportamiento térmico realizados se verifican acorde a los resultados mostrados a continuación, en la tabla 6-2, correspondientes a la identificación del polímero poli tereftalato de etileno (PET).

**Tabla 6-2:** Características del comportamiento térmico del PET

Polímero	Llama Olor	TP, TE, Elast.	Color fuego	Auto extinguible	Otras características
PET	Dulce	Termoplástico	Amarillo	Enciende	-Derretimiento -Forma fibras con facilidad -Hollín

**Fuente:** (Canevarolo, 2020, pp. 281-336).

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

### 2.10.3. Espectroscopía FTIR

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se trata de una de las técnicas más importantes y conocidas para la identificación de polímeros y caracterización de sus productos.

La técnica se basa principalmente en la interacción existente entre la materia y la radiación electromagnética de longitudes de onda en la región infrarroja, misma que produce cambios vibratorios y rotacionales en la molécula distintiva de la estructura química de la sustancia analizada basándose en la teoría de que, cada grupo químico del polímero tiene un patrón de absorción de IR característico que puede correlacionarse con su estructura molecular (Naranjo et al., 2008, pp. 7-53).

- **Espectrofotómetro Infrarrojo**



**Figura 4-2:** Espectrofotómetro Infrarrojo

**Realizado por:** Alvarado, M.2021



**Tabla 7-2:** Especificaciones Espectrofotómetro Infrarrojo

<b>Modelo</b>	JASCO FT/IR-4100
<b>Rango de medición, número de onda</b>	7,800 a 350 cm <sup>-1</sup>
<b>Resolución</b>	0,9 cm <sup>-1</sup>
<b>Software</b>	Quick start system.

Realizado por: Alvarado, M.2021.

**Tabla 8-2:** Metodología para el análisis de espectroscopía por Transformada de Fourier

### Metodología para la determinación del espectro FTIR del Poli Tereftalato de Etileno

<b>Materiales y Equipos</b>	<b>Reactivos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algodón</li> <li>• Espátula</li> <li>• Espectrofotómetro Infrarrojo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra de Poli Tereftalato de Etileno</li> <li>• Alcohol antiséptico.</li> </ul>

#### Procedimiento

- Presionar el Switch Power para encender el equipo
- Manipular el software Spectra Manager del ordenador conjuntamente iniciando el barrido.
- Eliminar impurezas sobre el área destinada para la muestra con un trozo de algodón y alcohol antiséptico (Cristal de seleniuro de zinc, soporte y capuchón de tornillo).
- Realizar el Background al verificar la ausencia de sustancia en el área de muestra, cerrar la tapa del equipo y presionar el botón Start ubicado en la parte frontal.
- Realizar el barrido espectral colocando la muestra sobre el cristal del área de muestra, quitar el seguro ubicado en la parte posterior, jalar hacia adelante el tornillo de ajuste, ajustarlo hasta que muestre fricción, cerrar la tapa y pulsar Start.
- Procesar el espectro utilizando el programa Spectra Analysis, corregir las escalas seleccionando y eliminar el CO<sub>2</sub>.
- Identificar y etiquetar los picos más relevantes asignando límites de lectura.
- Guardar el espectro como un archivo del mismo programa o en un procesador de texto Word
- Repetir los mismos pasos para todas las muestras.
- Finalmente cerrar todos los programas y apagar el equipo de ambos switch, apagar el ordenador y desconectar los equipos.

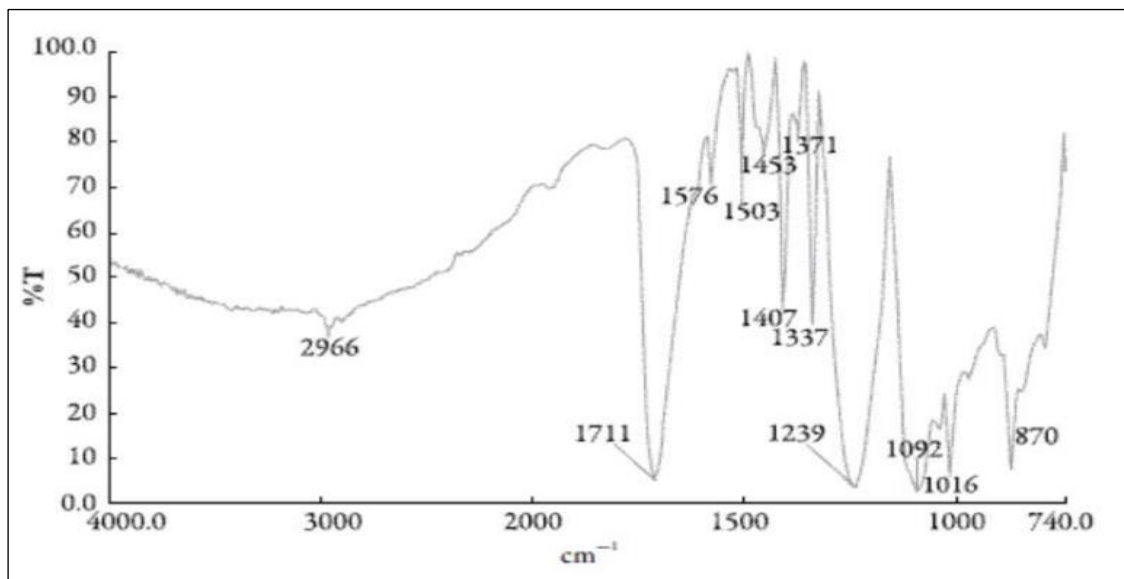
Fuente: Manual de operación de Espectrofotómetro Infrarrojo FTIR del Laboratorio de Análisis Instrumental, ESPOCH.

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

#### a. Poli Tereftalato de Etileno

El poli tereftalato de etileno posee grupos funcionales que pueden reaccionar con diferentes reactivos como agua, ácido o bases, alcoholes, aminas y glicoles (Palhano Zanela et al., 2018),

éstos se pueden identificar por medio de un espectro IR, en la tabla 19-2 se observan los principales grupos funcionales con su respectivo número de onda correspondientes al polímero PET.



**Figura 5-2:** Espectro estándar IR de Poli Tereftalato de Etileno

Fuente: (Flores & Francisco, 2017).

**Tabla 9-2:** Absorción espectral principal en  $cm^{-1}$  de los grupos funcionales del PET

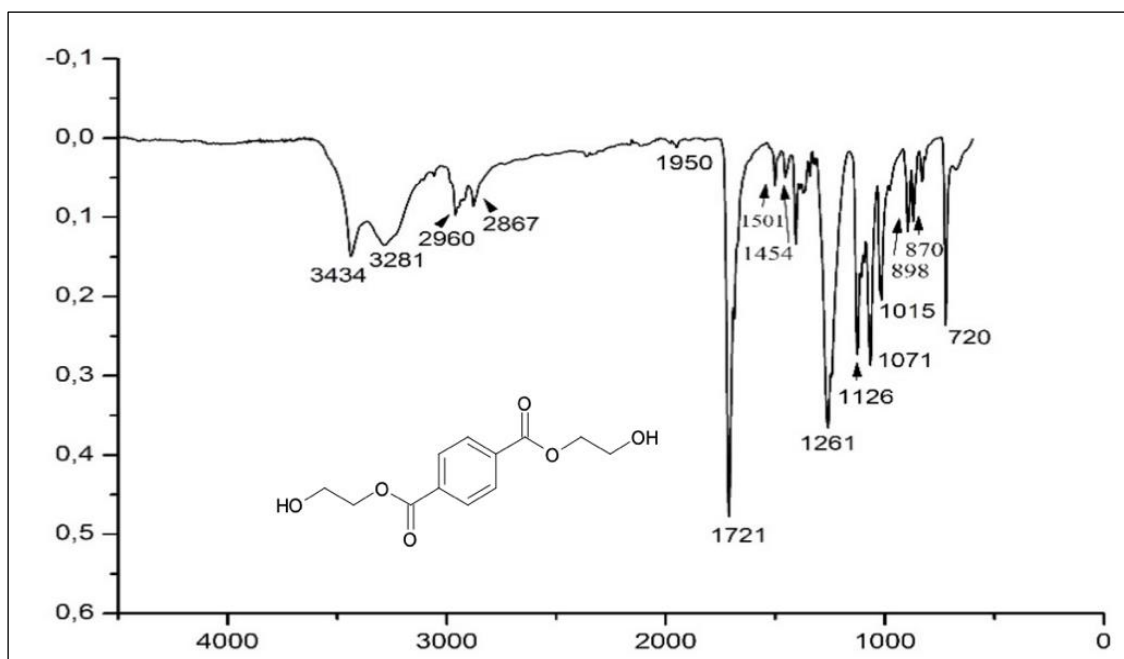
Bandas de absorción IR	Grupo Funcional
1740–1710	–C = O éster glicol
2966	–CH glicol
1505-1454	–CH anillo
1453-1407	–C = C anillo
1239	–C – O – C éster glicol

Fuente: (Mecozzi & Nisini, 2019, pp. 119-126).

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

## b. Producto de la glucólisis de PET

El producto principal de la glucólisis catalizada es el monómero Bis (2-hidroxiethyl) tereftalato más conocido por siglas BHET mismo que puede ser identificado por medio de técnicas de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, a continuación se describe el espectro estándar basado en literatura para la identificación de sus grupos funcionales.



**Figura 6-2:** Espectro FTIR de BHET

Fuente: (Palhano Zanela et al., 2018, p.227).

En el espectro estándar de la figura 6-2 correspondiente a la molécula de BHET, se observan picos relevantes a  $2867\text{cm}^{-1}$  y  $2960\text{cm}^{-1}$  correspondientes a los picos de absorción de vibraciones de estiramiento simétricas y asimétricas de los grupos  $C\text{sp}^3 - H$  y  $C\text{sp}^2 - H$ .

Por otro lado, las bandas sobresalientes observadas a  $3434\text{cm}^{-1}$  y  $3281\text{cm}^{-1}$  son atribuidas a las vibraciones del enlace  $O - H$  en las cadenas terminales. El pico prominente en  $1126\text{cm}^{-1}$  hace referencia a los enlaces  $C - O$  del alcohol confirmando la presencia de grupos hidroxilo.

Los picos en  $1261\text{cm}^{-1}$ ,  $1071\text{cm}^{-1}$  y  $1015\text{cm}^{-1}$  se deben a los enlaces éster  $C - O$ , se observa un pico a la altura de  $1721\text{cm}^{-1}$  que corresponde grupo carbonilo  $C = O$ . Finalmente, las bandas en  $1501\text{cm}^{-1}$ ,  $1454\text{cm}^{-1}$  y  $720\text{cm}^{-1}$  corresponden a los enlaces  $C = C$  del anillo aromático (Palhano Zanela et al., 2018, p.228)

#### 2.10.4. Preparación de la muestra

La glucólisis de PET como proyecto de investigación, se llevó a cabo con la utilización de botellas de PET marca DASANI recicladas siguiendo el esquema que se muestra en la figura 8-2.

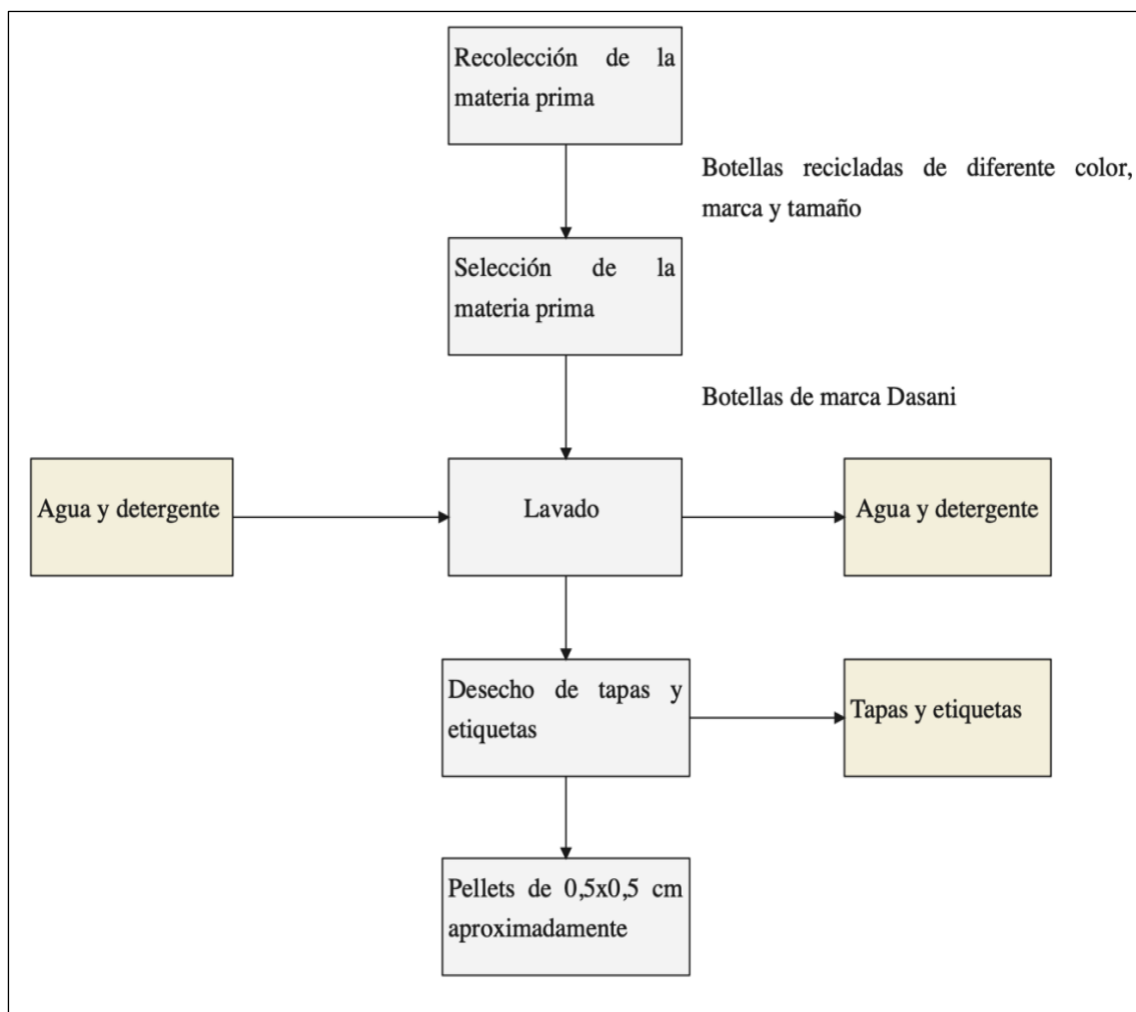
Inicialmente fueron recogidas las botellas PET desechadas en diferentes puntos dentro de la institución (ESPOCH), tomando en consideración las botellas correspondientes a diferentes marcas de agua mineral y gaseosa de varios sabores y seleccionando específicamente aquellas botellas de agua mineral sin color marca DASANI.

Posteriormente se realizó el lavado de las botellas con fines de eliminación de sustancias como polvo y desechos orgánicos que pudiesen afectar al proceso más adelante, una vez realizado el lavado, se procedió a retirar las etiquetas de cada una de las botellas evitando así la contaminación o envenenamiento de las muestras de PET con muestras de polímeros de otra clase que pudieran afectar a los productos esperados y rendimiento en la reacción de glucólisis de PET.

Para la obtención de los pellets que serán utilizados, inicialmente se cortaron manualmente tiras de cada botella recolectada en aproximadamente 0,5 x 0,5 cm con el objetivo minimizar el tamaño de partícula y asegurar la mayor conversión de materia prima posible durante el proceso.



**Figura 7-2:** Muestra de PET  
Realizado por: Alvarado, M. 2021.



**Figura 8-2:** Esquema de preparación de muestras de PET post-consumo  
 Realizado por: Alvarado, M. 2021.

### 2.10.5. Glucólisis catalizada de PET

Posterior a la caracterización de la materia prima por técnicas de espectroscopía IR, siguiendo el esquema planteado en la figura 2-2 correspondiente al diseño experimental de la investigación para la despolimerización del PET a través de glucólisis catalizada, se realizaron 3 ensayos en función de las variables planteadas como tipo y cantidad de catalizador empleado para la reacción. Para el tipo de catalizador se realizaron ensayos con tres sustancias, una de ellas Acetato de zinc, sustancia propuesta por (Hu et al., 2020) debido al efecto catalítico que ésta sustancia ejerce sobre la reacción, la segunda correspondiente al Carbonato de sodio anhidro (Duque-Ingunza et al., 2014) considerando a dicha sustancia como un sustituyente menos contaminante que las dos sustancias restantes y finalmente el Óxido de zinc (Fuentes et al., 2020, pp. 4991-5001).

### Materiales

- Balón de 2 bocas de 250 mL
- Balón de 2 bocas de 500 mL
- Tubo refrigerante
- Soportes universales
- Pinzas para soporte universal
- Mangueras
- Termómetro con escala de 0 - 400°C
- Espátula
- Vidrio reloj
- Probeta 5mL
- Mortero con pistilo
- Kitasato 250 mL
- Embudo Büchner
- Papel filtro

### **Reactivos**

- PET reciclado
- Acetato de Zinc  $Zn(OAc)_2$
- Carbonato de Sodio ( $Na_2CO_3$ )
- Óxido de zinc  $ZnO$
- Etilenglicol grado técnico
- Agua destilada

### **Equipos**

- Plancha de calentamiento
- Bomba de vacío
- Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR
- Balanza analítica

### **Procedimiento**

Para la degradación de PET vía Glucólisis se utilizaron las 3 diferentes sustancias catalizadoras mencionadas anteriormente, Acetato de Zinc  $C_4H_6O_4Zn$ , Carbonato de sodio  $Na_2CO_3$  y Óxido

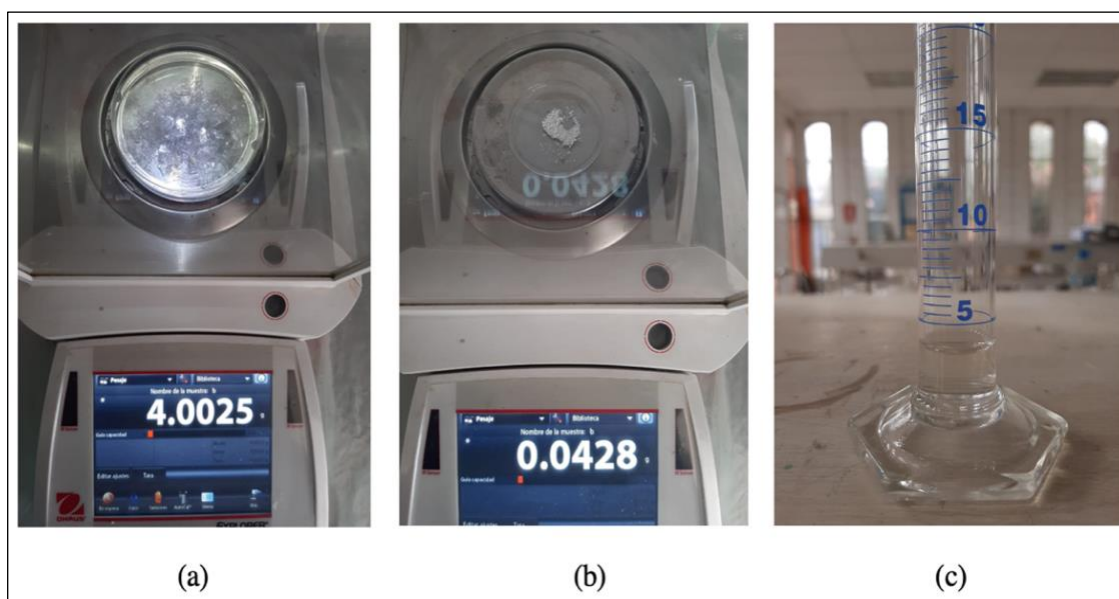
de Zinc ZnO y dos cantidades de cada una de ellas en la reacción de glucólisis de PET, las cantidades alimentadas de cada catalizador se especifican en la tabla 10-1.

**Tabla 10-2:** Especificaciones cantidad de catalizador

Cantidad	$C_4H_6O_4Zn$		$Na_2CO_3$		$ZnO$	
Masa (g)	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05
Peso molecular (g/mol)	219.5	219.5	105.9	105.9	81.38	81.38
Moles (mol)	0,00018	0,00022	0,00037	0,00047	0,00049	0,00061

Realizado por: Alvarado, M.2021.

Los ensayos se realizan variando la sustancia y la cantidad de catalizador alimentado como se muestra en la tabla anterior, manteniendo ciertas condiciones constantes como son la temperatura, ésta medida en un intervalo de 180-190°C con un tiempo de reacción de 2 horas, la cantidad de PET utilizada al inicio de la reacción fue de 4 g y la cantidad de EG de 3ml para cada ensayo considerando una proporción de PET/EG de 1:3 óptima para la reacción de glucólisis.



**Figura 9-2:** (a) Pesaje de la muestra de PET; (b) Pesaje del catalizador; (c) Volumen EG.

Realizado por: Alvarado, M.2021.

1. Inicialmente pesar la cantidad necesaria de PET reciclado, catalizador y etilenglicol acorde a los valores anteriormente mencionados, dependiendo de cada ensayo a realizarse.
2. Colocar la muestra de PET pesada previamente dentro del balón de 2 bocas conjuntamente con el catalizador y agitarlo por 2 minutos garantizando una mezcla completa del PET con el catalizador, el proceso se da en condiciones de presión atmosférica.



**Figura 10-2:** Mezcla PET/Catalizador  
Realizado por: Alvarado, M.2021.

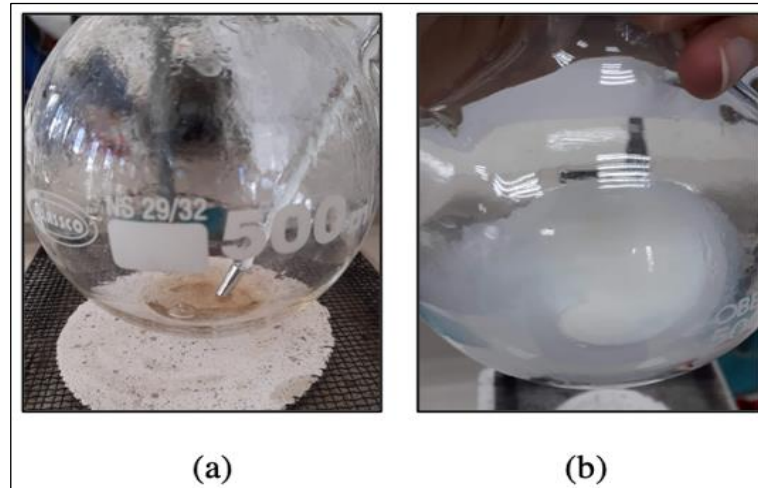
3. Posteriormente, agregar al balón de vidrio la cantidad de 3 mL de Etilenglicol y homogenizar la mezcla.
4. Armar el equipo, adaptando el balón de dos bocas con el tubo refrigerante recto de vidrio en un extremo del balón, éste con el objetivo de evitar pérdidas por evaporación, y el termómetro con una escala de temperatura de 0 - 400°C al extremo sobrante, éste con el objetivo de controlar constantemente la temperatura mientras ocurre la reacción.
5. Colocar el matraz de dos bocas equipado sobre la plancha de calentamiento, como se ilustra en la figura 10-2, enseguida, regular la perilla del equipo en su máxima capacidad e iniciar el proceso, verificando constantemente la temperatura del mismo, evitando variaciones altas en el rango de temperatura y que ésta se mantenga idealmente de entre un valor de 180°C hasta 190°C.



**Figura 11-2:** Equipo para el proceso de Glucólisis catalizada de PET  
Realizado por: Alvarado, M.2021.



- Después de 2 horas de reacción, apagar la plancha de calentamiento regulando a perilla a 0 y mantener la muestra a temperatura ambiente observándose una solución que contiene un precipitado y PET sólido sin reaccionar mismo que fue pesado posteriormente para el cálculo de  $(x)$ , el producto obtenido es de consistencia líquida y viscosa.



**Figura 12-2:** a) Muestra líquida después de reacción; (b) Muestra enfriada temperatura ambiente.

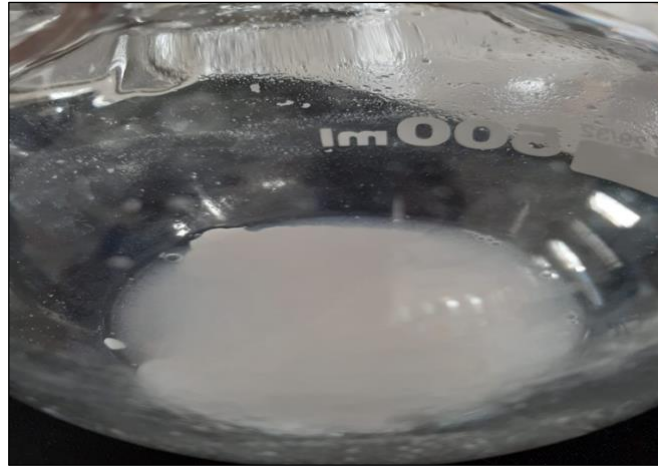
Realizado por: Alvarado, M. 2021.



**Figura 13-2:** PET sólido sin reaccionar

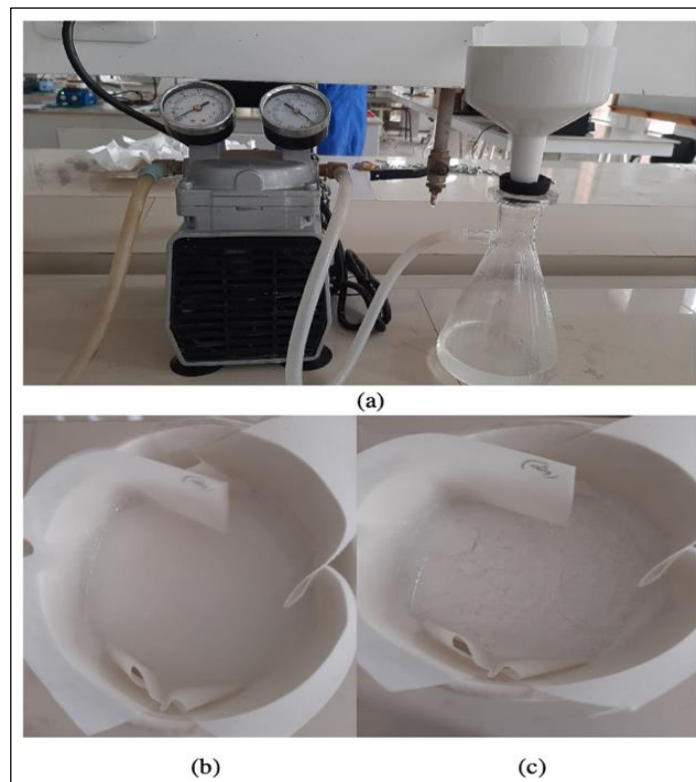
Realizado por: Alvarado, M. 2021.

- Una vez enfriada la muestra a temperatura ambiente, el contenido de cada muestra obtenida en el reactor de vidrio, lavarla con la cantidad necesaria de agua destilada caliente, agitándolo constantemente. Dicho procedimiento con el fin de disolver el etilenglicol, el catalizador utilizado y el producto de glucólisis BHET.



**Figura 14-2:** Lavado de la muestra con agua caliente  
Realizado por: Alvarado, M. 2021.

8. Disuelta la mezcla, filtrar el contenido al vacío obteniéndose así una fracción sólida, la torta de filtración presentada como una pasta blanca, dejar enfriar por un tiempo estimado de 5 horas a 4°C obteniéndose una especie de sustancia cristalina.

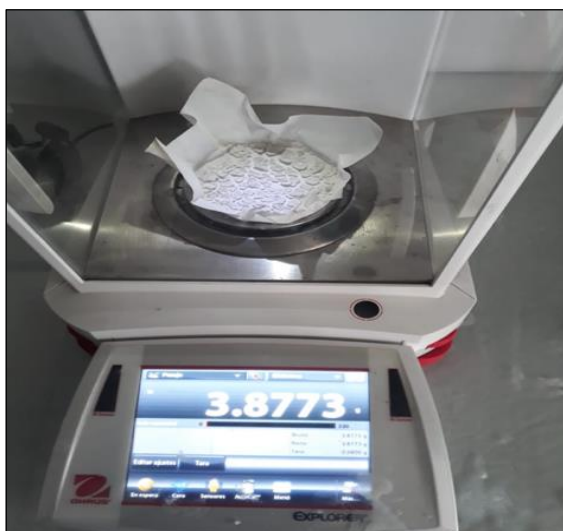


**Figura 15-2:** (a) Equipo de filtrado; (b) Muestra lavado BHET; (c) Torta de filtrado lechosa  
Realizado por: Alvarado, M. 2021.



**Figura 16-2:** Cristales de BHET obtenidos después de refrigeración  
Realizado por: Alvarado, M. 2021.

9. Posteriormente la muestra obtenida después de refrigeración, secarla en una estufa a 60°C por 24 horas y posteriormente, pesar el producto obtenido en una balanza analítica.



**Figura 17-2:** Pesaje del producto final  
Realizado por: Alvarado, M. 2021.

10. Finalmente, el producto después del pesaje, con la ayuda de un mortero con pistilo triturar la muestra obtenida para caracterizar el producto por técnicas de espectroscopía FT-IR.



**Figura 18-2:** Muestra posterior a la trituración  
Realizado por: Alvarado, M. 2021.

### ***2.10.6. Caracterización del producto de Glucólisis catalizada***

Para la caracterización de los productos de glucólisis catalizada se utiliza la técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) por medio de la utilización de un espectrofotómetro marca JASCO FT/IR-4100 en un rango de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $600\text{ cm}^{-1}$ , con una resolución de  $0,9\text{ cm}^{-1}$ , la metodología a seguir para la caracterización se presenta en la tabla 8-2.

### ***2.10.7. Conversión de PET y rendimiento del BHET***

La cantidad de producto obtenido se calculó a partir de las siguientes ecuaciones, donde X (%) corresponde a la conversión de PET en el proceso, Y (%) es el rendimiento del monómero BHET, expresados en términos de porcentaje (Stoski et al., 2016, pp.1024-1030).

El alcance de la reacción (X) en términos de porcentaje de despolimerización en el proceso de glucólisis de PET catalizada se refiere a la cantidad de materia despolimerizada y se calcula a partir de la ecuación 1 (Stoski et al., 2016, pp.1024-1030).

$$X(\%) = \frac{(X_{inicial\ PET} - X_{final\ PET})}{(X_{inicial\ PET})} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

$X_{inicial\ PET}$  = Masa inicial de PET (g)

$X_{final\ PET}$  = Masa de PET sólido sin reaccionar (g)

El rendimiento de BHET se calcula tomando en cuenta la cantidad de sustancia obtenida como producto de glucólisis en relación a la masa de materia de PET alimentado en el proceso.

$$Y(\%) = \frac{W_{BHET}}{W_{PET0}} \times 100 \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

$W_{BHET}$  = Masa de BHET producido en gramos

$W_{PET0}$  = Masa de PET inicial en gramos

### **2.10.8. Análisis estadístico**

El análisis estadístico se trata de una herramienta o técnica utilizada para la identificación de tendencias, por medio de ésta se puede realizar un análisis de un conjunto de datos extrayendo información acerca de los datos significativos que no se pueden visualizar evidentemente en un experimento (Mason et., al 2013).

#### **a. Análisis de varianza**

El análisis de varianza o también conocido como test ANOVA es un método estadístico que trabaja en función del valor medio de dos o más grupos que difiere entre ellos, éste se lo realiza a través del valor de probabilidad (p) utilizado como una opción para aceptar o rechazar la hipótesis nula  $H_0$  acorde al nivel de significancia ( $\alpha$ ) (Alassaf & Qamar, 2020).

El análisis de varianza se realiza con el objetivo analizar los datos obtenidos a partir del diseño experimental planteado al inicio de la investigación con dos variables independientes correspondientes al tipo de catalizador empleado para la reacción de glucólisis de PET y variación en la cantidad de cada uno de ellos, tomando en cuenta la variable dependiente correspondiente al porcentaje de rendimiento de reacción y seleccionando con cuál de ellas se trabajaría para optimizar las condiciones del proceso.

Para éste análisis se ha empleado un ANOVA de dos vías para saber si los valores de la variable dependiente (% rendimiento) dependen dos factores o de la interacción entre éstos.

#### **b. Test de Tukey**

El test de tukey es un método que se basa en la comparación de medias individuales que se consiguen en un análisis de varianza manteniendo el número de réplicas constante (N),

permitiendo diferenciar entre los datos obtenidos si existen diferencias significativas (Alassaf & Qamar, 2020).

El método se basa en la evaluación de las hipótesis planteadas

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 \quad \text{Medias iguales}$$

$$H_A = \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \quad \text{Medias diferentes}$$

La diferencia honestamente significativa se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$HSD = Q \sqrt{\frac{SC}{N}}$$

Dónde:

Q= Valor obtenido de la tabla de Tukey en función de los tratamientos y grados de libertad del error.

SC= Media cuadrática

N=Número de réplicas por tratamiento

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 RESULTADOS


##### 3.1.1 Ensayos para la caracterización del PET

La caracterización del PET reciclado se realizó en función a los parámetros previamente mencionados en la metodología de la tabla 6-2 acerca de las características físicas del polímero, a continuación en la tabla 1-3 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos para la identificación del PET.

La identificación del tipo de plástico utilizado para la experimentación, se realizó en primera instancia en función a su codificación, verificándose el numeral 1 en la muestra de botella DASANI correspondiente al poli tereftalato de etileno (PET) según la tabla 2-1.

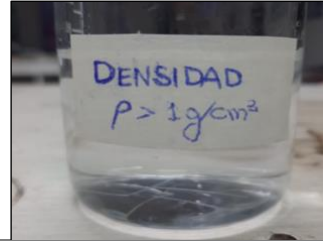
Las características del PET, como la densidad, se verificó en base al ensayo con agua destilada, donde se pudo apreciar que la muestra de plástico se mantuvo sumergida en el medio acuoso, (Canevarolo, 2020) afirma que la densidad del poli tereftalato de etileno es de  $1,38 \text{ g/cm}^3$ , es importante recalcar que la densidad del plástico no influye directamente en la reacción de glucólisis, sin embargo es importante conocer las propiedades del material para su identificación. El comportamiento térmico observado durante la combustión de la muestra analizada denota que la muestra corresponde al polímero PET, éste, al ser un polímero semicristalino, al fundirse se observó un cambio de color en el material, de lechoso a transparente, después de ser sometido al calor también se observaron ciertas características como el hollín adherido a la superficie del polímero, todas estas características asociadas al polímero PET.

**Tabla 1-3:** Caracterización de la muestra de PET

Parámetro	Descripción	Ilustración
Tipo de plástico	Polímero PET 1	

---

Densidad del polímero  $\rho = 1,38 \text{ g/cm}^3$



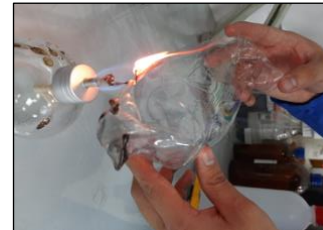
---

Color fuego Amarillo



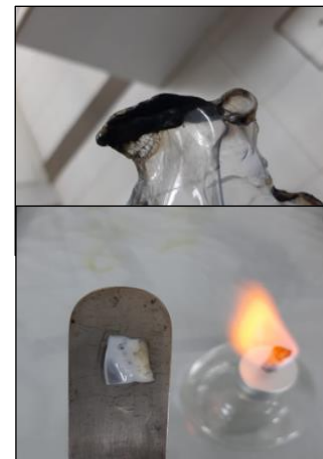
---

Auto extingible Sí



---

Otras características Hollín



---

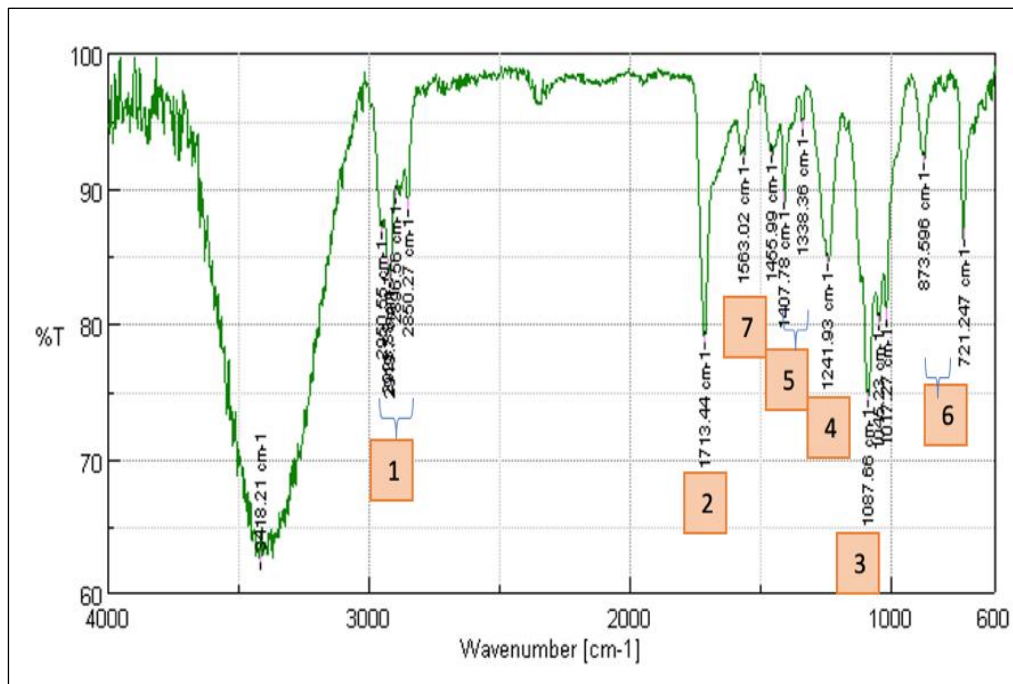
**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

En base a los resultados obtenidos de la tabla 1-3, después de observar las propiedades físicas experimentalmente, y realizado su análisis se puede comparar los resultados con (Canevarolo, 2020) verificando así que la muestra alimentada en el proceso se trata específicamente de Poli Tereftalato de Etileno (PET), sin embargo, es necesario realizar análisis adicionales de identificación como FT-IR para determinar si existen sustancias como aditivos que pueden estar presentes en el polímero y entender su comportamiento.



### 3.1.2 Caracterización por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Las muestras de plástico PET post-consumo correspondientes a la marca DASANI utilizadas a lo largo de la experimentación, se caracterizaron por medio de técnicas FT-IR siguiendo la metodología planteada en la tabla 8-2, por transmitancia y con espectros definidos en un rango de 4000 a 600 $cm^{-1}$ .



**Figura 1-3:** Espectro IR de la muestra de Poli Tereftalato de Etileno post-consumo  
Realizado por: Alvarado, M. 2021.

**Tabla 2-3:** Absorción espectral principal  $cm^{-1}$  de los grupos funcionales del PET

Ord.	Número de onda $cm^{-1}$	% Transmitancia	Grupo Funcional
1	2950.55	86.8107	Alifáticos
	2919.7	83.172	Enlace C – H asimétricos
	2850.27	88.5558	
2	1713.44	78.6443	Aromático
3	1087.66	74.3276	Enlace éster C = O
			Grupo Tereftalato
4	1241.93	84.5359	Estiramiento asimétrico enlaces
			– O – C – C

5	1338.36	94.4721	Deformación
	1407.78	89.072	Alcano C – H
6	873.59	92.0347	Aromático C – H
	721.24	86.234	
7	1563.02	92.4042	Amidas N – H

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

En la figura 1-3 se observa el espectro IR de la muestra del material PET utilizado para la reacción de glucólisis correspondiente a botellas de marca DASANI, el espectro FT-IR confirma la presencia de enlaces C – H (estiramiento asimétrico) correspondiente a los números de onda de  $2950.55\text{cm}^{-1}$  -  $2850.27\text{cm}^{-1}$ , además en el numeral 2 en un número de onda  $1713\text{cm}^{-1}$  que según (Guapisaca Sigüenza & Pintado Barbecho, 2019) son correspondientes a las vibraciones de tereftalato confirmando la presencia del grupo carbonilo C = O, el numeral 3 y el numeral 4 con un número de onda de  $1087.66\text{cm}^{-1}$  y  $1241.93\text{cm}^{-1}$  según (Bahramian, 2021, pp. 215-229) son correspondientes a los enlaces de estiramiento asimétrico del grupo tereftalato  $OO\text{C} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{COO}$ , las bandas identificada en el numeral 5  $1338.36\text{cm}^{-1}$  y  $1407.78\text{cm}^{-1}$  son debidas a la deformación del enlace C – H (Vijayakumar & Rajakumar, 2012, pp.58-65), en el numeral 6 se identificaron grupos funcionales atribuidos a la vibración de enlace C – H en el anillo aromático, finalmente en el numeral 7 se observa un número de onda de  $1563.02\text{cm}^{-1}$  mismo que se acerca al valor correspondiente al número de onda de los grupos funcionales de las amidas enlace N – H mismas que aparecen en un rango de  $1640\text{-}1550\text{ cm}^{-1}$ , dicho grupo funcional se puede apreciar debido a la presencia de aditivos agregados al polímero para mejorar sus propiedades (Lear et al., 2021), el análisis de los espectros demostraron que en efecto en la muestra analizada existen los grupos funcionales correspondientes al poli tereftalato de etileno PET que concuerdan con los espectros analizados por (Pereira et al., 2017, pp.411-420) y por (Flores & Francisco, 2017), además se pueden observar claramente que existen ciertas variaciones que distorsionan el espectro que podrían deberse a inconvenientes relacionados con el espectrofotómetro utilizado para la caracterización.

### 3.1.3 Reciclaje químico de poli tereftalato de etileno por medio de glucólisis catalizada

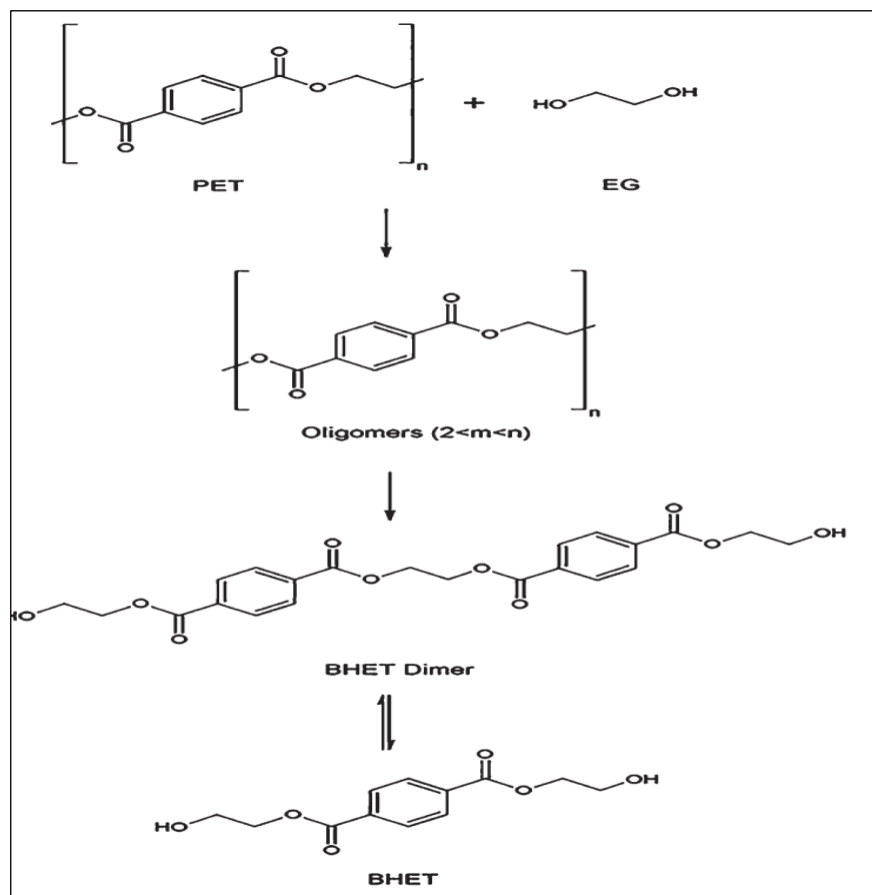
Es importante mencionar que el objetivo principal de la investigación es encontrar el catalizador por el cual se obtenga el mayor rendimiento de BHET considerando ciertas variables de operación a presión atmosférica como las más influyentes en el proceso mismas que fueron elegidas en base a estudios realizados experimentalmente por varios autores.

### 3.1.3.1 Condiciones de reacción

#### a. Temperatura de reacción

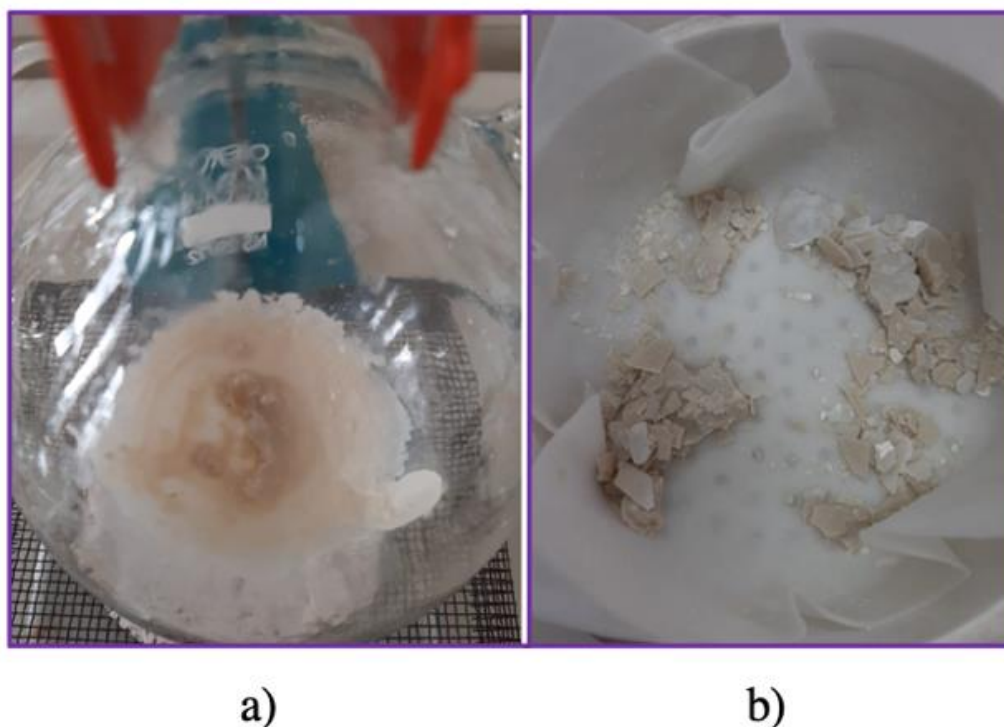
Según Stoski et al. (2016), uno de los parámetros que podrían alterar el proceso y los resultados en la glucólisis de PET es la temperatura de reacción, en base a los estudios realizados, al incrementar la temperatura en una reacción de glucólisis de PET de 150°C a 170°C, ésta ejerce un efecto positivo sobre la reacción favoreciendo al grado de despolimerización de PET y rendimiento de reacción, por otro lado, si la temperatura se mantiene a 150°C, las moléculas tienen menos energía disponible para romper las cadenas del PET que a 170°C, por lo que la reacción de glucólisis catalizada ocurre más rápida y eficazmente a una temperatura de 170°C o temperaturas ligeramente superiores considerando el punto de ebullición del Etilenglicol correspondiente a 197°C.

Por otra parte Stoski et al. (2016) también menciona que a temperaturas inferiores a 180°C se ha demostrado que se pueden formar oligómeros de diferentes pesos moleculares que limitan el grado de pureza del BHET, éstos pueden ser de estructuras tales como se muestran en la figura 2-3.



**Figura 2-3:** Estructuras de compuestos resultantes de la glucólisis de PET  
Fuente: (Stoski et al., 2016, pp. 1024-1030).

Además, es importante considerar que experimentalmente a una temperatura de 200°C se obtienen productos de reacción no favorable, de consistencia sólida, con gran cantidad de grumos e imposibles de caracterizar por técnicas convencionales, como se muestra en la figura 3-3.

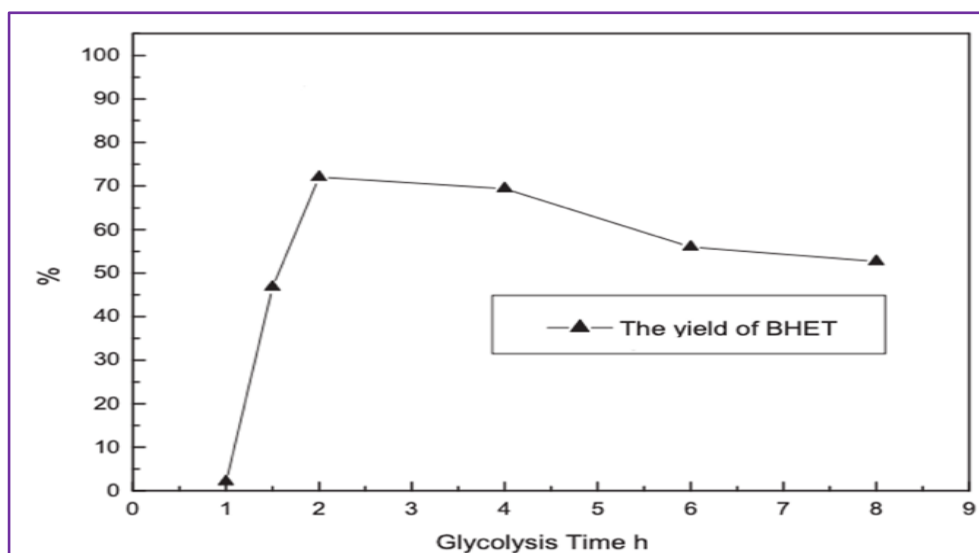


**Figura 3-3:** Producto glucólisis 200°C (a) Enfriada temperatura ambiente (b) Filtrado  
Realizado por: Alvarado, M. 2021.

Es por ello que dentro de la investigación, la temperatura se ubica en un intervalo de entre 180°C y 190°C debido a razones antes explicadas y adicionalmente a ello se tomó como referencia la temperatura de ebullición del Etilenglicol de 197°C, tomando en consideración que a 200°C no se obtiene un buen producto que se pueda cuantificar y caracterizar.

#### **b. Tiempo de reacción**

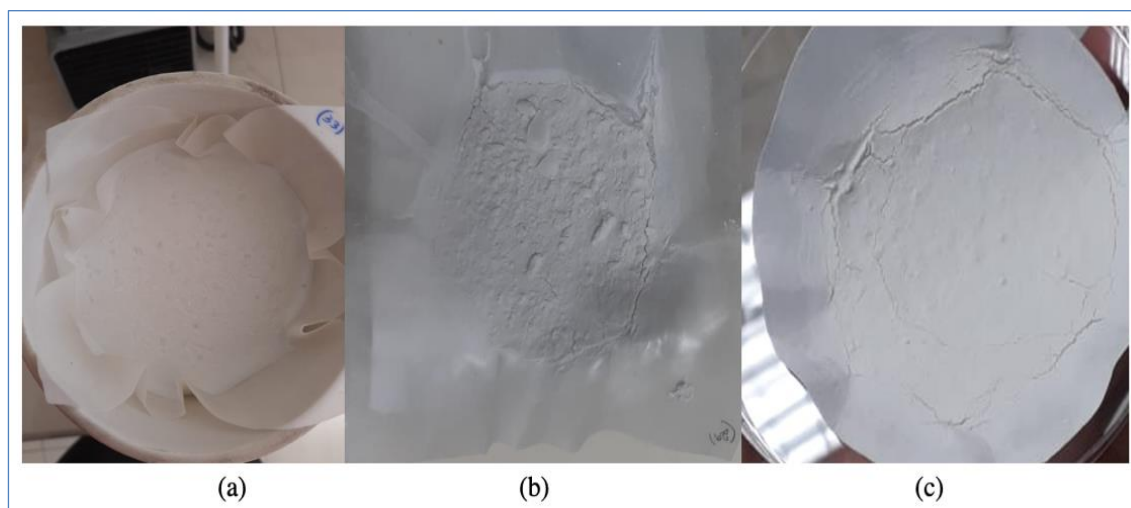
El tiempo de reacción es un parámetro importante al igual que la temperatura, en la investigación realizada se tomó como referencia el estudio realizado por Yue et al. (2011) en donde se examinó los efectos del tiempo en la reacción de glucólisis y se determinó que el rendimiento de BHET incrementa hasta en un tiempo reacción de 2 horas alcanzando su máximo valor, sin embargo a medida que transcurría el tiempo, el valor de rendimiento en % se vió afectado de manera negativa tal y como se muestra en la figura 4-3.



**Figura 4-3:** Rendimiento de BHET en la reacción de glucólisis, efecto del tiempo  
**Fuente:** (Yue et al., 2011, pp. 339-403).

### 3.1.3.2 Rendimiento de los productos finales

A continuación, en la figura 5-3 se pueden apreciar los productos obtenidos a partir de la reacción de glucólisis catalizada por las tres sustancias utilizadas a lo largo de la investigación.



**Figura 5-3:** (a) Producto de glucólisis catalizada por  $C_4H_6O_4Zn$  (b) Producto de glucólisis catalizada por  $ZnO$  (c) Producto de glucólisis catalizada por  $Na_2CO_3$   
**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

El rendimiento de las muestras obtenidas en el proceso de glucólisis, en cada experimentación expresada en porcentajes, fueron calculados aplicando la ecuación 2, además del porcentaje de conversión de PET aplicando la ecuación 1 mencionadas en el apartado 2.10.7.

En la tabla 3-3 y 4-3 se presentan los resultados obtenidos después de la reacción de cada ensayo en cuanto al rendimiento y conversión de PET respectivamente expresados en porcentaje.

**Tabla 3-3:** Porcentaje de conversión de PET (X)

<b>Óxido de Zinc</b>				<b>Acetato de Zinc</b>				<b>Carbonato de sodio</b>			
<b>0,04</b>		<b>0,05</b>		<b>0,04</b>		<b>0,05</b>		<b>0,04</b>		<b>0,05</b>	
Masa (g)	%X	Masa (g)	%X	Masa (g)	%X	Masa (g)	%X	Masa (g)	%X	Masa (g)	%X
0,8534	78,6831	0,8995	77,5237	0,6487	83,8080	0,5322	86,7070	0,5934	85,1798	0,9054	77,3684
0,8421	78,9738	0,9123	77,3701	0,6532	83,7054	0,5034	87,4273	0,6453	83,8683	0,899	77,5872
0,7001	82,5080	0,936	76,6146	0,6334	84,1527	0,5121	87,2097	0,7076	82,3202	0,7089	82,5058

Realizado por: Alvarado, M. 2021

**Tabla 4-3:** Rendimiento de BHET (Y)

<b>Catalizador</b>	<b>Repetición</b>	<b>Cantidad del catalizador</b>	<b>Peso PET (g)</b>	<b>Peso BHET</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
<b>Óxido de zinc</b>	1	0,042	4,0034	3,17505	79,31
	2	0,0424	4,005	3,202	79,95
	3	0,0451	4,0024	3,3146	82,82
	1	0,0505	4,002	3,1335	78,30
	2	0,0588	4,0314	3,1263	77,55
	3	0,0501	4,0025	3,0202	75,46
<b>Acetato de Zinc</b>	1	0,042	4,0063	3,4129	85,19
	2	0,0405	4,0087	3,3602	83,82
	3	0,0415	3,9969	3,4555	86,45
	1	0,0507	4,0036	3,4359	85,82

	2	0,0526	4,0039	3,5983	89,87
	3	0,0545	4,0038	3,52	87,92
<b>Carbonato de Sodio</b>	1	0,0406	4,004	3,3076	82,61
	2	0,0422	4,0002	3,343	83,57
	3	0,0434	4,0023	3,2024	80,01
	1	0,0515	4,0006	3,0796	76,98
	2	0,0591	4,0111	3,0907	77,05
	3	0,0569	4,0522	3,1827	78,54

---

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

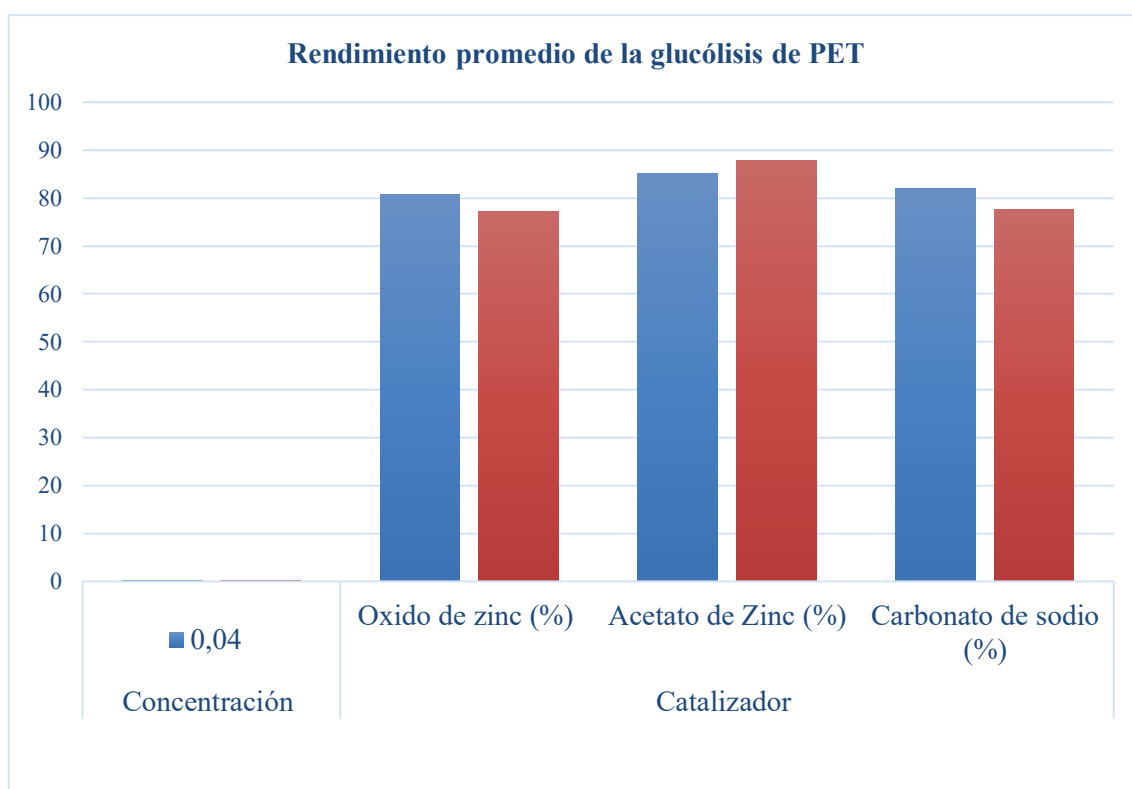


**Tabla 5-3:** Rendimiento promedio BHET obtenido expresado en porcentaje

Cantidad (g)	Catalizador		
	Óxido de zinc (%)	Acetato de Zinc (%)	Carbonato de sodio (%)
0,04	80,69	85,16	82,06
0,05	77,10	87,87	77,52

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

En la tabla 5-3 se presenta a manera de resumen el rendimiento promedio de BHET obtenido en cada uno de los ensayos realizados en la investigación de glucólisis catalizada de PET tomando en cuenta variables de estudio como tipo y cantidad del catalizador empleado.



**Gráfico 1-3:** Rendimiento promedio obtenido con los tres tipos de catalizadores

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

Como se observa en el gráfico 1-3, el rendimiento de reacción en función de las variables experimentadas es relativamente mayor con uno de los catalizadores empleados, cabe recalcar que acorde a los valores obtenidos, éstos varían en un pequeño margen alcanzando así un rendimiento máximo promedio de 87,87% para el catalizador Acetato de Zinc a medida que la cantidad de catalizador aumenta, de 0,04 g a 0,05 g Acetato con la cantidad de 4g de PET alimentado.

La glucólisis de PET al ser una reacción de transesterificación utiliza catalizadores de transesterificación con el objetivo de incrementar la velocidad de reacción, uno de ellos, el acetato de zinc, éste compuesto es considerado el mejor catalizador debido a que el  $Zn^{2+}$  es el metal más activo y más a fin para la activación de los grupos carbonilo del PET en la reacción de glucólisis (Al-Sabagh et al., 2016, pp. 364-377).

Además Langer et al. (2020) en su estudio menciona que la eficacia de los acetatos metálicos en la glucólisis de PET se da en el siguiente orden  $Zn^{2+} > Pb^{2+} > Mn^{2+}$  por debajo de los 245 °C, esto basado en el mecanismo de reacción presentado en el apartado 1.2.5.1 donde el metal forma un complejo con el grupo carbonilo facilitando el ataque de EG a PET induciendo a mejores rendimientos de BHET.

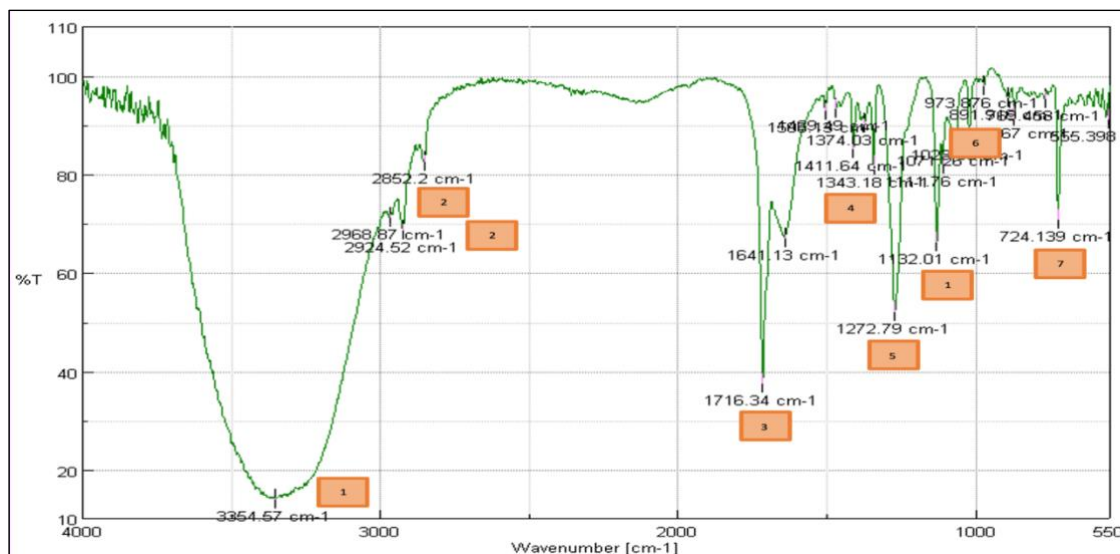
Por otro lado, las sales de sodio, una de ellas el carbonato de sodio pueden despolimerizar el PET casi tan eficientemente como el acetato de zinc incrementando ligeramente la cantidad de catalizador respecto al acetato de zinc, éste se ha utilizado ya que es considerado como un sustituto al uso de compuestos con metales pesados debido a la toxicidad y no biodegradabilidad del catión  $Zn^{2+}$  a diferencia del  $Na^{1+}$ , López-Fonseca et al. (2011) estudiaron la glucólisis catalizada por Carbonato de sodio a las mismas condiciones obteniéndose resultados de rendimiento cercanos al 80% que se acercan a los rendimientos obtenidos con acetato de zinc.

Se observa también que el menor porcentaje de rendimiento obtenido se le atribuye al catalizador  $ZnO$ , Fuentes et al. (2020) ha demostrado que con la utilización de  $ZnO$  como catalizador de glucólisis de PET se han obtenido rendimientos en monómero BHET de entre el 50 y 60% , considerado un rendimiento bajo en relación a otros catalizadores como el acetato de zinc y el carbonato de sodio, el efecto catalítico de la sustancia se asocia con el área superficial, Idriss & Barteau (2000) en su estudio sobre catálisis con óxidos metálicos menciona que, el efecto del catalizador de una sustancia es proporcional al área superficial, uno de los inconvenientes que presentan los óxidos metálicos son la sinterización o aglutinamiento del mismo provocando un incremento en el tamaño de partícula, reduciendo el área superficial por ende, su actividad catalítica y consecuentemente presentar la disminución del rendimiento en producto, para ello se considera necesario el uso de sustancias adicionales conocidas como promotores, extendiendo el catalizador sobre la superficie de un soporte poroso, evitando así que dicho fenómeno ocurra en la reacción y el catalizador no pierda su efectividad.

### 3.1.3.3 Caracterización de los productos de glucólisis catalizada de PET

#### a. Análisis por espectroscopía de Infrarrojo FT-IR

Los productos obtenidos después de la reacción de glucólisis catalizada de PET fueron analizados por medio de espectroscopía FT-IR siguiendo la metodología antes mencionada y considerando un producto con cada catalizador.



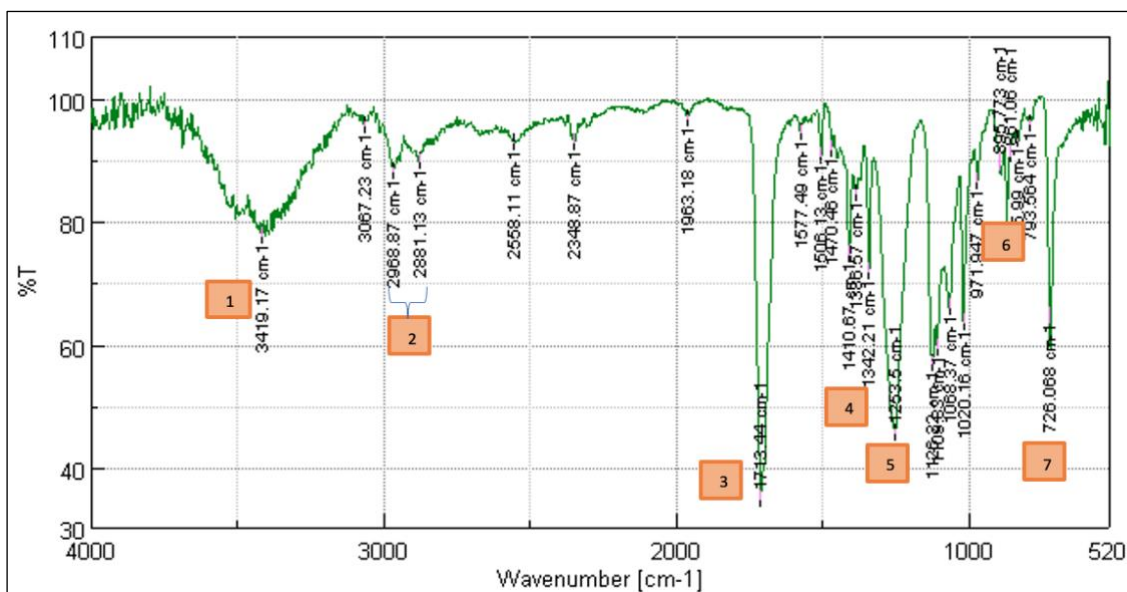
**Figura 6-3:** Espectro IR de BHET catalizada por Óxido de Zinc

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

**Tabla 6-3:** Absorción espectral principal  $\text{cm}^{-1}$  del producto catalizado por Óxido de Zinc

Ord.	Número de onda $\text{cm}^{-1}$	% Transmitancia	Grupo Funcional
1	3354.57	14.0373	-OH Alcohol
2	2852.2	82.605	C-H Alquilo
	2968.87	71.2529	
3	1716.34	37.4677	$C = O$ Estiramiento Ácido carboxílico
4	1411.64	85.2973	$C = C$ Bandas de estiramiento Anillo aromático
5	1132.01	66.3667	C – O
	1272.79	52.07	Estiramiento Enlace éster asimétrico
6	891.916	95.5295	C – H Vibración Anillo aromático de fenilo
7	724.139	70.7849	C – H p sustituido en el anillo de fenilo.

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

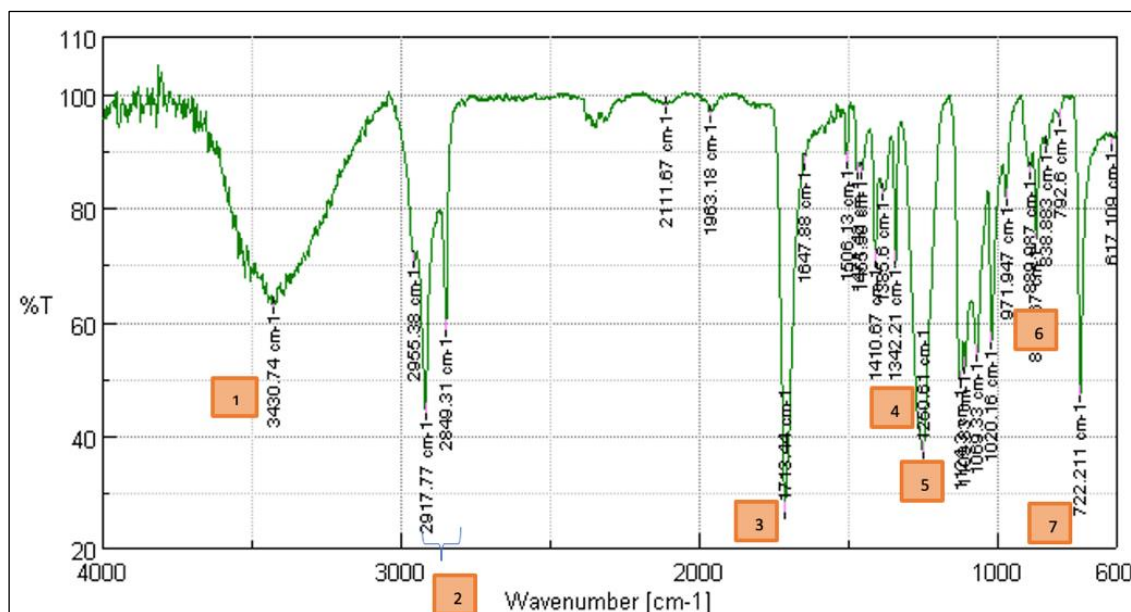


**Figura 7-3:** Espectro IR de BHET catalizada por Acetato de zinc  
 Realizado por: Alvarado, M. 2021.

**Tabla 7-3:** Absorción espectral principal  $\text{cm}^{-1}$  del producto catalizado por Acetato de Zinc

Ord.	Número de onda $\text{cm}^{-1}$	% Transmitancia	Grupo Funcional
1	3419.17	77.6288	-OH Alcohol
2	2968.87	88.1731	C-H Alquilo
	2881.13	89.8118	
3	1713.44	34.7054	$C = O$ Estiramiento Ácido carboxílico
4	1410.77	74.4996	$C = C$ Bandas de estiramiento Anillo aromático
5	1253.5	45.3998	$C - O$ Estiramiento Enlace éster asimétrico
6	895.773	89.4717	$C - H$ Vibración Anillo aromático de fenilo
7	726.068	64.5847	$C - H$ p sustituido en el anillo de fenilo.

Realizado por: Alvarado, M. 2021.



**Figura 8-3:** Espectro IR de BHET catalizada por Carbonato de sodio  
**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

**Tabla 8-3:** Absorción espectral principal  $cm^{-1}$  del producto catalizado por Carbonato de Sodio

Ord.	Número de onda $cm^{-1}$	% Transmitancia	Grupo Funcional
1	3430.74	62.7734	-OH Alcohol
2	2849.31	58.6409	C-H Alquilo
	2917.77	44.0495	
3	1713.44	26.6668	$C = O$ Estiramiento Ácido carboxílico
4	1410.67	70.8202	$C = C$ Bandas de estiramiento Anillo aromático
5	1250.61	37.2395	C – O Estiramiento Enlace éster asimétrico
6	889.987	86.4807	C – H Vibración Anillo aromático de fenilo
7	722.211	47.0562	C – H p sustituido en el anillo de fenilo.

**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

Las muestras del producto obtenido con cada uno de los catalizadores fueron caracterizadas por espectroscopía FT-IR medidos en un rango de  $4000-600cm^{-1}$ . En las figuras 6-3, 7-3 y 8-3 se observan los espectros obtenidos de la molécula de BHET con la utilización de los 3 catalizadores estudiados en la investigación, se muestra claramente que los espectros son muy parecidos entre sí, adquieren números de onda que difieren entre sí en mínimas cantidades, es decir se observa una leve diferencia en la intensidad de las bandas, esto se lo puede relacionar con fallas en el equipo (Walton & Reyes, 1983, p. 408).

Se han resaltado los picos más prominentes y su correspondiente grupo funcional, como se indica, el BHET obtenido luego de la despolimeración del PET por glucólisis tienen los picos similares al espectro estándar en el estudio de despolimerización de PET realizado por Bahramian (2021), mismos que podrían indicar un buen grado de pureza del producto, se observa un pico ancho de  $3354.57\text{cm}^{-1}$  correspondiente a los grupos OH del BHET,  $2852.2\text{cm}^{-1}$  y  $2968.87\text{cm}^{-1}$  (alquilo C – H), en  $1716.34\text{cm}^{-1}$  enlaces C = O, en  $1411.64\text{cm}^{-1}$  enlaces C = C, en  $1132.01\text{cm}^{-1}$  y  $1272.09\text{cm}^{-1}$  atribuidos a un enlace éster C – O, además se confirma la existencia del anillo fenilo aromático mientras que los picos de absorción de  $871.916\text{cm}^{-1}$  y  $794.139\text{cm}^{-1}$  representan el anillo fenilo aromático y la sustitución simétrica ‘p’ en un anillo de fenilo respectivamente.

#### 3.1.3.4 Análisis Estadístico

##### a. Análisis ANOVA

Se realizó un análisis de varianza ANOVA con ayuda del software Infostat, a partir de los datos obtenidos en la experimentación, a fin de obtener la contribución de los factores y sus interacciones sobre la variable de respuesta, dicha variable de respuesta correspondiente al rendimiento del BHET como producto de glucólisis, además de determinar qué factor y los niveles en cuanto al tipo de catalizador y la cantidad de catalizador influye de manera positiva sobre el rendimiento en el producto, a continuación, en la figura 36-3 se pueden observar los resultados obtenidos en cuanto al análisis de varianza para 2 factores.

Considerando las siguientes hipótesis

$H_0$  = El tipo de catalizador y la cantidad de catalizador utilizado en la reacción de glucólisis de PET no afecta en el porcentaje de rendimiento de BHET.

$H_A$  = El tipo de catalizador y la cantidad de catalizador utilizado en la reacción de glucólisis de PET sí afecta en el porcentaje de rendimiento de BHET.

Análisis de la varianza					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
Rendimiento	18	0,90	0,85	1,98	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	269,12	5	53,82	20,62	<0,0001	
Tipo de catalizador	207,80	2	103,90	39,80	<0,0001	
Concentracion de catalizad..	14,65	1	14,65	5,61	0,0355	
Tipo de catalizador*Concen..	46,67	2	23,33	8,94	0,0042	
Error	31,32	12	2,61			
Total	300,44	17				

**Figura 9-3:** Test ANOVA para 2 factores  
Realizado por: Alvarado, M. 2021.

Dónde

**F.V** = Variables o factores de control

**SC** = Suma de cuadrados

**gl** = Grados de libertad

**CM** = Media cuadrática

**F** = Factor F

**p – valor** = Probabilidad

En base a la tabla de resultados obtenidos en la figura 36-3, el análisis de varianza demuestra que:

- Tipo de catalizador  
 $F(2,12) = 39,80, p < 0,05$
- Cantidad del catalizador  
 $F(1,12) = 5,61, p < 0,05$
- Interacción Tipo\*cantidad de catalizador  
 $F(2,12) = 8,94, p < 0,05$

Es decir, existen efectos principales estadísticamente significativos de las tres variables correspondientes al tipo de catalizador, cantidad de catalizador y la interacción entre ambos, sobre la variable de respuesta que es el porcentaje de rendimiento de BHET en función del error y los grados de libertad, con un p-valor menor a 0,05, éstos correspondientes a 0.0001, 0.0355 y 0.0042 respectivamente, rechazando de esta manera la hipótesis nula planteada  $H_0$  y por ende aceptando la hipótesis alternativa  $H_A$ .

## b. Test de Tukey

La comparación múltiple realizada en la prueba de significancia honesta de Tukey muestra de manera específica cuáles de las muestras presentan diferencias estadísticamente significativas en función de las interacciones.

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=2,48859				
Error: 2,6104 gl: 12				
Tipo de catalizador	Medias	n	E.E.	
Oxido de zinc	78,90	6	0,66	A
Carbonato de sodio	79,79	6	0,66	A
Acetato de zinc	86,51	6	0,66	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,65945				
Error: 2,6104 gl: 12				
Concentracion de catalizad..	Medias	n	E.E.	
0,05	80,83	9	0,54	A
0,04	82,64	9	0,54	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=4,43103					
Error: 2,6104 gl: 12					
Tipo de catalizador	Concentracion de catalizad..	Medias	n	E.E.	
Oxido de zinc	0,05	77,10	3	0,93	A
Carbonato de sodio	0,05	77,52	3	0,93	A
Oxido de zinc	0,04	80,69	3	0,93	A B
Carbonato de sodio	0,04	82,06	3	0,93	B C
Acetato de zinc	0,04	85,15	3	0,93	C D
Acetato de zinc	0,05	87,87	3	0,93	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Figura 10-3:** Test de TUKEY

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

A partir de los resultados obtenidos en el test de Tukey de la figura 10-3 se observa que existen diferencias estadísticamente significativas tanto para la cantidad de catalizador como para el tipo de catalizador, considerando que no existe diferencia entre el Óxido de Zinc y el Carbonato de sodio, pero si existe una diferencia notable con el Acetato de zinc.

Por otra parte para la interacción de las dos variables muestran que existen diferencias estadísticamente significativas en cuanto al tipo y cantidad del catalizador empleado, lo que quiere decir que la reacción no solo se ve afectada por factores independientes sino también por la interacción entre éstos factores, se ha encontrado que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las interacciones del óxido de zinc y carbonato de sodio para una menor y mayor cantidad de catalizador (0,04 g ZnO - 0,05 g ZnO) simultáneamente, además de no existir diferencias significativas entre el acetato de zinc con 0,04 g 0,05 g de catalizador y entre el acetato de zinc y el carbonato de sodio con 0,04 g catalizador.



Al analizar las medias reflejadas en las tablas tukey, se encuentra que dentro de los parámetros óptimos para la obtención de mejores rendimientos en BHET vía glucólisis en cuanto al tipo de catalizador se atribuye al Acetato de Zinc con una cantidad de 0,05 g de sustancia, cabe recalcar que las medias en común (D) entre las dos cantidades no son estadísticamente significativas por lo que es mejor utilizar una cantidad de alimentación de 0,04 g de catalizador considerando economizar costos en cuanto a cantidad de reactivo a utilizarse para la reacción.

El test de Tukey afirma que los rendimientos máximos para la reacción se obtienen con 0,05g de acetato de zinc seguido del carbonato de sodio con 0,04 g.

Como se mencionó en el apartado 3.1.3.2 los acetatos metálicos juegan un papel muy importante en la reacción de glucólisis de Poli Tereftalato de Etileno, considerando que el acetato de zinc contiene al metal más activo induciendo así a la obtención de rendimientos de BHET superiores al 80% (Al-Sabagh et al., 2016, pp. 364-377), además de ello se debe tomar en cuenta de que el metal  $Zn^{2+}$  debido a su toxicidad podría ser reemplazado por una sal de sodio menos contaminante que pudiera alcanzar rendimientos muy cercanos a los del acetato de zinc alimentando una cantidad ligeramente mayor de catalizador respecto al acetato de zinc, en contraste, se pueden observar ciertos datos que no concuerdan con lo investigado respecto a la cantidad de catalizador empleado como es el caso del Carbonato de sodio ya que a mayor concentración el rendimiento del producto glicolizado disminuye de 82,06% a 77,52% respectivamente para cada sustancia, a dicho fenómeno se lo asocia por un lado tanto con errores sistemáticos considerando que se utilizan cantidades muy pequeñas de catalizador y por otro lado considerando los errores aleatorios asociados al uso de las balanza analíticas, además otro factor a considerar es el tamaño de partícula del PET ya que éste juega un papel importante, es decir a menor tamaño se incrementa el área superficial disponible para la reacción, mismo que no fue evaluado con total exactitud para cada uno de los ensayos.

## **3.2. Hipótesis**

### **3.2.1. Hipótesis General**

#### **Hipótesis I**

- La determinación del tipo de catalizador adecuado en la reacción de glucólisis se puede realizar a partir de muestras de Poli Tereftalato de Etileno PET post-consumo estimando el porcentaje de rendimiento en la reacción.

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=4,43103					
Error: 2,6104 gl: 12					
Tipo de catalizador	Concentracion de catalizad..	Medias	n	E.E.	
Oxido de zinc	0,05	77,10	3	0,93	A
Carbonato de sodio	0,05	77,52	3	0,93	A
Oxido de zinc	0,04	80,69	3	0,93	A B
Carbonato de sodio	0,04	82,06	3	0,93	B C
Acetato de zinc	0,04	85,15	3	0,93	C D
Acetato de zinc	0,05	87,87	3	0,93	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Figura 11-3:** Test de TUKEY para la prueba de hipótesis

Realizado por: Alvarado, M. 2021.

Después de realizado el procedimiento, obtención y análisis de resultados desde el punto de vista estadístico como muestra el test de Tukey, se conoce entonces que el tipo de catalizador óptimo para la reacción se determina en función del rendimiento de producto glucolizado, en la reacción mientras mayor porcentaje de rendimiento mejor afinidad del catalizador para el proceso, éste se obtiene con poli tereftalato de etileno (PET) post-consumo como materia prima, y el catalizador óptimo es el Acetato de zinc.

### 3.2.2. Hipótesis Específicas

#### Hipótesis I

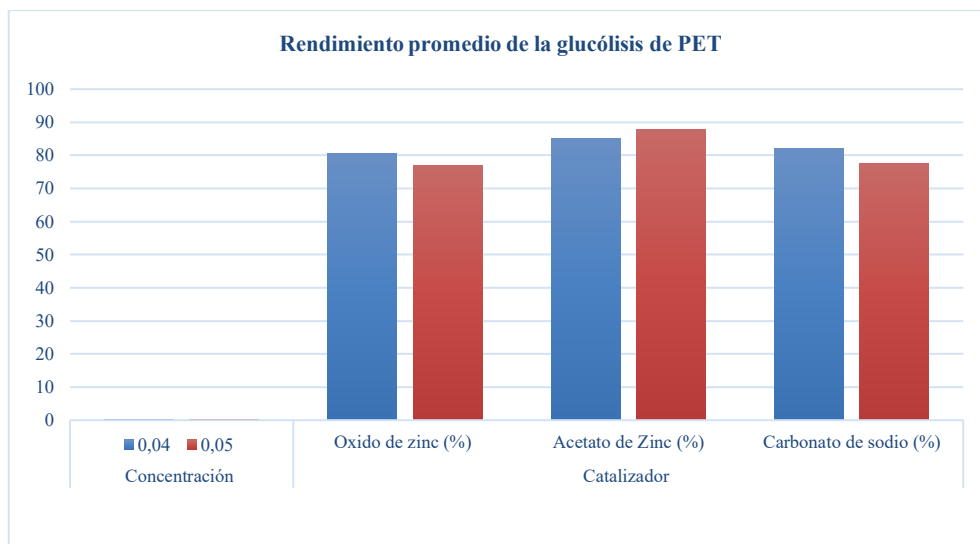
- La temperatura es una de las variables que ayudan a definir las condiciones de operación del proceso de glucólisis de PET post-consumo.

Tomando en cuenta estudios realizados previamente por diferentes autores, se puede determinar que la temperatura óptima de reacción de glucólisis se ubica de entre 180 a 190°C, al incrementar la temperatura en una reacción, ésta ejerce un efecto positivo sobre la misma, favoreciendo al grado de despolimerización de PET y rendimiento de reacción, tomando en consideración el punto de ebullición del Etilenglicol correspondiente a 197°C como referencia.

#### Hipótesis II

- Los tipos de catalizadores como derivados de metales afectan significativamente en la conversión y rendimiento de la reacción de Glucólisis de PET

El metal es el elemento más importante en la reacción de glucólisis catalizada, éste actúa formando un complejo con el grupo carbonilo del polímero facilitando el ataque de EG sobre el PET y acelerando el proceso de degradación, uno de ellos tiene mayor afinidad y mejora el porcentaje de producto obtenido de acuerdo al análisis estadístico



**Gráfico 2-3:** Rendimiento promedio obtenido validación de hipótesis  
**Realizado por:** Alvarado, M. 2021.

Se informa que utilizando el catalizador acetato de zinc en ciertas condiciones de proceso antes determinadas se obtienen mejores resultados en rendimiento del proceso de glucólisis valores de hasta 85,16% utilizando una cantidad ligeramente mayor de sustancia catalizadora.

### Hipótesis III

- La caracterización del producto obtenido BHET a partir de técnicas de espectroscopía IR permite identificar los grupos funcionales correspondientes a la estructura del producto validando el experimento.

Luego del análisis de los respectivos espectros se pudo evidenciar la presencia del compuesto de interés, BHET, a través del reconocimiento de los principales grupos funcionales que lo componen.

Los picos más representativos se pueden identificar en base a los siguientes números de onda

- Vibraciones a  $3396\text{cm}^{-1}$  atribuidos al grupo funcional O – H.
- Se observa un pico prominente a  $1718\text{cm}^{-1}$  atribuido a los grupos éster carbonilo
- A  $1105\text{cm}^{-1}$  se observa un pico fuerte correspondiente al enlace C – O
- Adicionalmente el pico observado a  $810\text{cm}^{-1}$  correspondiente al enlace C – H sustituido en el anillo de fenilo.

## CONCLUSIONES

La glucólisis de Poli Tereftalato de Etileno sin la adición de un catalizador es una reacción muy lenta, es por ello que el uso de catalizadores son importantes para el desarrollo óptimo de la misma, se ha determinado que la presencia de acetatos metálicos inducen a un mejor rendimiento de producto esperado, considerando la presencia de metales más activos como el zinc que favorecen a la formación de producto BHET formando complejos que facilitan el ataque del etilenglicol siguiendo el mecanismo de reacción.

Uno de los parámetros importantes dentro del proceso es la temperatura de reacción, ésta juega un papel importante considerando que a temperaturas de 180°C hasta 190°C se obtiene un producto de características óptimas y producto BHET relativamente puro.

El catalizador que presentó mejores resultados evaluando el rendimiento en producto glucolizado fue el acetato de zinc, experimentalmente se determinó que con 0,04g de catalizador se obtuvieron rendimientos promedio de 85,16% considerando que los acetatos metálicos cumplen su función catalítica haciendo referencia al metal que lo compone en éste caso el  $Zn^{2+}$  que es el metal más activo, sin embargo ha sido una sustancia cuestionable debido a su toxicidad por lo que podría ser reemplazado por el carbonato de sodio mismo que presenta rendimientos casi similares al acetato de zinc.

A partir de las técnicas de espectroscopía infrarroja se identificó la presencia del compuesto Bis (2-hidroxietil) tereftalato como producto principal de la reacción de glucólisis analizando los picos prominentes en el espectro y comparándolos con un espectro estándar.

## RECOMENDACIONES

Es importante tener en cuenta que para la caracterización de los catalizadores se utilice un espectrofotómetro FT-IR que trabaje en un rango de número de onda de  $4000\text{ cm}^{-1}$  hasta  $300\text{ cm}^{-1}$ , con el objetivo de poder apreciar la vibración del enlace  $M - OH_2$  que contiene el metal en la sustancia mismo que se da aproximadamente en un número de onda de  $394\text{ cm}^{-1}$ .

Es importante verificar que los equipos como la balanza analítica se encuentren debidamente calibrados con el fin de evitar errores en los resultados

Al momento de preparar la materia prima, asegurarse de que ésta se encuentra debidamente limpia evitando introducir impurezas que pudieran alterar la reacción.

Estimar el tamaño de pellet adecuado y exacto, asegurándose de que los mismos tengan las mismas dimensiones.

## GLOSARIO

**Acetato de Zinc.** Es un compuesto químico cuya fórmula es  $Zn(O_2CCH_3)_2$ , que se encuentra de forma hidratada o anhidra, encontrándose en estado sólido incoloro, utilizado generalmente en la síntesis química y también en suplementos dietéticos (Walton & Reyes, 1983, p. 408).

**Carbonato de sodio.** Comúnmente conocido como sosa cáustica, el mismo que es de tipo alcalino, sal blanca y traslúcida que se utiliza en la industria para la fabricación de jabón, vidrio y tintes (Convención Farmacopea USA, 2018).

**Catalizador.** Es una sustancia que de manera efectiva aumenta o reduce la velocidad dentro de un proceso de reacción química dentro de un determinado objetivo propuesto. Los catalizadores son compuestos orgánicos, inorgánicos o de composiciones complejas de tipo líquido, sólido o gaseoso (Guapisaca Sigüenza & Pintado Barbecho, 2019).

**Degradación.** Son reacciones en donde las moléculas orgánicas pierde átomos de carbono, es decir que las moléculas complejas van descomponiéndose en más simples (Shojaei et al., 2020, p.2912).

**Espectroscopía.** Se centra en el estudio de la interacción generada entre la radiación electromagnética y la materia, en donde se puede identificar la absorción o emisión de energía radiante (Stoski et al., 2016, p. 1024).

**Glucólisis.** Se determina que es una ruta metabólica encargada de oxidar la glucosa con la finalidad de obtener energía para la célula (Sheel & Pant, 2019, pp. 61-84).

**Hidrolítico.** Es una reacción química que se genera entre una molécula de agua y otra macromolécula, en donde el agua se divide y rompe uno o más enlaces químicos en donde los átomos se unen y forma otra especie química (Canevarolo, 2020, pp. 281-336).

**Microplásticos.** Son fragmentos de plásticos menores a cinco milímetros que pueden ser alojados en los seres vivos y que además contaminan el medio ambiente, estos provienen de neumáticos, ropa, botellas, productos comestibles, procesos industriales (Palhano Zanela et al., 2018, p.228).

**Óxido de zinc.** Este producto comúnmente se utiliza en medicamentos como protector solar, pero también en la elaboración de una gran variedad de productos de cuidado personal, lociones, jabones y talco (Al-Sabagh et al., 2016, pp. 364-377).

**Polímeros.** Los polímeros se generan a través de la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas conocidas como monómeros que forman grandes cadenas de diversas formas, la cual está formado por moléculas de tamaño normal o gigantes (Sangalang et al., 2015, pp.45-53)..

## BIBLIOGRAFÍA

**ALASSAF, M., & QAMAR, A. M.** *Improving Sentiment Analysis of Arabic Tweets by One-way ANOVA*. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences [En línea]. 2020. ISSN 1319-1578. DOI 10.1016/j.jksuci.2020.10.023. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.10.023>

**ALOMOTO, P., & ELIZABETH, A.** Diseño del proceso para la obtención de resina poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET) [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Politécnica Nacional. Ingeniería Química y Agroindustria. Quito, Ecuador. 2014. pp. 3-208 [Consulta: 2020-11-21]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7493>

**AL-SABAGH, A. M., YEHIA, F., et al.,** *Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate*. Egyptian Journal of Petroleum [en línea]. 2016, vol. 25, no. 1, pp. 53-64. ISSN 20902468. DOI: 10.1016/j.ejpe.2015.03.001. Disponible en : <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.001>

**BABOORAM, K.** *Chapter 1—Brief overview of polymer science*. [En línea]. Narain (Ed.), 2020. [Consulta: 20 Octubre 2020]. Disponible en: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816806-6.00001-7>

**BAHRAMIAN, A.** “Synergistic effects of gamma irradiation on the PET surface and heat treatment of hydrotalcite catalyst supported by Pt/TiO<sub>2</sub> nanoparticles on PET depolymerization rate”. *Surface and Interface Analysis* [en línea], 2021, (United States of America), 53(2), pp. 215-229. [Consulta: 20 Diciembre 2020]. Disponible en: Scopus. <https://doi.org/10.1002/sia.6903>

**CAMPBELL, F. C.** *Chapter 11 - Commercial Composite Processes: These Commercial Processes Produce Far More Parts than the High-performance Processes*. [En línea]. Amsterdam: Elsevier Science, 2004. [Consulta: 2 December 2020] *Manufacturing Processes for Advanced Composites* (pp. 399-438). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-185617415-2/50012-5>

**CANEVAROLO, S. V.** *Polymer Science 10—Experiments in Polymer Science*. [En línea]. Hanser, 2020. [Consulta: 2 Enero 2020]. Disponible en : <https://doi.org/10.3139/9781569907269.010>

**DUQUE-INGUNZA, I., et al.** “Process optimization for catalytic glycolysis of post-consumer PET wastes”. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* [en línea], 2014, 89(1), pp. 97-103. [Consulta: 26 Febrero 2021]. Disponible en :<https://doi.org/10.1002/jctb.4101>

**FLORES, S., & FRANCISCO, D.** Degradación de materiales plásticos “PET” (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión. [en línea] (Trabajo de titulación). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito-Ecuador. 2017. [Consulta: 18 Enero 2021]. Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/13224>

**FUENTES, C. A., et al.** “Catalytic Glycolysis of Poly(ethylene terephthalate) Using Zinc and Cobalt Oxides Recycled from Spent Batteries”. *Waste and Biomass Valorization* [en línea], 2020, 11(9), pp. 4991-5001. [Consulta: 5 Marzo 2021] ISSN 1877-265X. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00807-6>

**GEORGE, N., & KURIAN, T.** “Recent developments in the chemical recycling of postconsumer poly(ethylene terephthalate) Waste. Industrial and Engineering Chemistry Research” *Scopus* [en línea], 2014, 53(37), pp. 14185-14198. [Consulta: 17 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/ie501995m>

**GUAPISACA SIGÜENZA, A. C., & PINTADO BARBECHO, F. A.** (2019). Valoración de métodos químicos para obtener ácido tereftálico a partir del tereftálico de polietileno PET. [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana, Ingeniería Ambiental. (Cuenca-Ecuador). 2019. pp. 4-103 [Consulta: 16 Marzo 2021] . Disponible en : <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17631>

**HOPEWELL, J., et. al** (2009). “Plastics recycling: Challenges and opportunities”. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* [en línea], 2009, 364(1526), pp. 2115-2126. [Consulta: 27 Mayo 2021]. ISSN 0962-8436. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>

**HU, Y., et al.** “Synthesis of poly (ethylene terephthalate) based on glycolysis of waste PET fiber”. *Scopus Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry* [en línea], 2020, 57(6), pp. 430-438. [Consulta: 14 Marzo 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10601325.2019.1709498>



**IDRISS, H., & BARTEAU, M. A.** *Active sites on oxides: From single crystals to catalysts* [en línea]. USA En *Advances in Catalysis*, 2000 [Consulta: 15 Marzo 2021]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0360-0564\(02\)45016-X](https://doi.org/10.1016/S0360-0564(02)45016-X)

**JOHNSON, M. K., POWELL, D. B., & CANNON, R. D.** “Vibrational spectra of carboxylato complexes—I. Infrared and Raman spectra of beryllium (II) acetate and formate and of zinc(II) acetate and zinc(II) acetate dihydrate”. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy* [en línea], 1981, 37(10), pp. 899-904. [Consulta: 3 Marzo 2021]. ISSN 0584-8539. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0584-8539\(81\)80011-6](https://doi.org/10.1016/0584-8539(81)80011-6)

**KUMAR, R., & SINGH, R.** *Prospect of Recycling of Plastic Product to Minimize Environmental Pollution* [en línea]. En S. Hashmi & I. A. Choudhury (Eds.), *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 2020. [Consulta: 2 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11302-5>

**LANGER, E., et al.** *2—Classification of Plasticizers* [en línea]. USA: William Andrew Publishing En E. Langer, K. Bortel, S. Waskiewicz, & M. Lenartowicz-Klik (Eds.), 2020. [Consulta: 3 Marzo 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46200-6.00002-7>

**LANGER, E., et al.** *5—Methods of PET Recycling.* [en línea]. USA: William Andrew Publishing en E. Langer, K. Bortel, S. Waskiewicz, & M. Lenartowicz-Klik (Eds.), 2020. [Consulta: 3 Marzo 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46200-6.00005-2>

**LEAR, G., et al.** “Plastics and the microbiome: Impacts and solutions. *Environmental Microbiomes*” *Scopus* [en línea], 2021, 16(1). [Consulta: 17 Marzo 2021]. DOI 10.1186/s40793-020-00371-w. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>

**LÓPEZ-FONSECA, R., et al.** “Chemical recycling of post-consumer PET wastes by glycolysis in the presence of metal salts” *Polymer Degradation and Stability* [en línea], 2010,95(6), pp. 1022-1028. [Consulta: 17 Diciembre 2020]. ISSN 0141-3910. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.03.007>

**LÓPEZ-FONSECA, R., et al.** “Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate”. *Scopus Chemical Engineering Journal* [en línea], 2011, 168(1), pp. 312-320. [Consulta: 1 Marzo 2021]. DOI 10.1016/j.cej.2011.01.031. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.031>

**MANDAL, S., & DEY, A.** *1—PET Chemistry Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles* [en línea] W-USA: William Andrew Publishing En S. Thomas, A. Rane, K. Kanny, A. V.k., & M. G. Thomas (Eds.), 2019. [Consulta: 13 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811361-5.00001-8>

**MECOZZI, M., & NISINI, L.** “The differentiation of biodegradable and non-biodegradable polyethylene terephthalate (PET) samples by FTIR spectroscopy: A potential support for the structural differentiation of PET in environmental analysis”. *Infrared Physics & Technology* [en línea], 2019, 101, pp. 119-126. [Consulta: 18 Enero 2021]. ISSN 1350-4495. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.06.008>

**NARANJO, A., et al.** *Spectroscopy* [en línea]. Hanser En T. A. Osswald, A. Roldán-Alzate, A. Naranjo, M. del Pilar Noriega E., & J. D. Sierra (Eds.), 2008. [Consulta: 17 Enero 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.3139/9783446418539.002>

**NATIONAL GEOGRAPHIC.** *20 datos sobre el problema del plástico en el mundo* [blog]. España : 2020 [Consulta: 29 Noviembre 2020]. Disponible en: [https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo\\_15282](https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo_15282)

**NGUYET THI HO, L., et al.** “Enhanced catalytic glycolysis conditions for chemical recycling of glycol-modified poly (ethylene terephthalate)”. *Scopus Polymer Degradation and Stability* [en línea], 2018, 155, pp. 15-21. [Consulta: 17 Diciembre 2020]. DOI 10.1016/j.polymdegradstab.2018.07.003. Disponible en : <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.07.003>

**NOVÁKOVÁ, K., et al.** “Experimental development of a plastic bottle usable as a construction building block created out of polyethylene terephthalate: Testing PET(b)rick 1.0”. *Journal of Building Engineering* [en línea], 2017, 12, pp. 239-247. [Consulta: 24 Enero 2021]. ISSN 2352-7102. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.05.015>

**PALHANO ZANELA, T. M., et al.** “Chemical Recycling of Poly (ethylene terephthalate) (PET) by Alkaline Hydrolysis and Catalyzed Glycolysis”. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry* [en línea], 2018, 10(3), pp. 226-233. [Consulta: 22 Febrero 2021]. ISSN 1984-6428. Disponible en: <https://doi.org/10.17807/orbital.v10i3.1104>

**PEREIRA, A. P. DOS S., et al.** “Processing and Characterization of PET Composites Reinforced With Geopolymer Concrete Waste”. *Materials Research* [en línea], 2017, 20, pp. 411-420. [Consulta: 16 Marzo 2021]. ISSN 1516-1439. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0734>

**RAHEEM, A. B., et al.** “Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review”. *Journal of Cleaner Production* [en línea], 2019, 225, pp. 1052-1064. [Consulta: 8 Diciembre 2020]. ISSN 0959-6526. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.019>

**RAVINDRANATH, K., & MASHELKAR, R. A.** “Polyethylene terephthalate—I. Chemistry, thermodynamics and transport properties”. *Chemical Engineering Science* [en línea], 1986, 41(9), pp. 2197-2214. [Consulta: 4 Diciembre 2020]. ISSN 0009-2509. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(86\)85070-9](https://doi.org/10.1016/0009-2509(86)85070-9)

**SANGALANG, A., et al.** “Generalized kinetic analysis of heterogeneous PET glycolysis: Nucleation-controlled depolymerization”. *Polymer Degradation and Stability* [en línea], 2015, 115, pp. 45-53. [Consulta: 9 Diciembre 2020]. ISSN 0141-3910. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.02.012>

**SCHWARZ, A. E., et al.** “Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach”. *Waste Management* [en línea], 2021, 121, pp. 331-342. [Consulta: 26 Mayo 2021]. ISSN 0956-053X. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020>

**SHEEL, A., & PANT, D.** *4—Chemical Depolymerization of PET Bottles via Glycolysis*. [en línea] William Andrew Publishing En S. Thomas, A. Rane, K. Kanny, A. V.k., & M. G. Thomas (Eds.), 2019. [Consulta: 3 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811361-5.00004-3>

**SHOJAEI, B., et al.** “Chemical recycling of PET: A stepping-stone toward sustainability”. *Scopus Polymers for Advanced Technologies* [en línea], 2020, 31(12), pp. 2912-2938. [Consulta: 8 Diciembre 2020]. DOI 10.1002/pat.5023. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/pat.5023>

**SOUSA, A. F., et al.** *7 - Polyethylene Terephthalate: Copolyesters, Composites, and Renewable Alternatives* [en línea]. Oxford USA: William Andrew Publishing En P. M. Visakh & M. Liang

(Eds.), 2015. [Consulta: 2 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31306-3.00007-5>

**STOSKI, A., et al.** “Oligomer production through glycolysis of poly(ethylene terephthalate): Effects of temperature and water content on reaction extent” . *Polymer International* [en línea], 2016, 65(9), pp.1024-1030. [Consulta: 19 Febrero 2021]. DOI 10.1002/pi.5146. Disponible en: Scopus. <https://doi.org/10.1002/pi.5146>

**VIJAYAKUMAR, S., & RAJAKUMAR, P. R.** “Infrared Spectral Analysis of Waste Pet Samples”. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy* [en línea], 2012, 4, pp. 58-65. [Consulta: 16 Marzo 2021]. ISSN 2299-3843. Disponible en: <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/ILCPA.4.58>

**WALTON, H. F., & REYES, J.** (1983). *Análisis químico e instrumental moderno* [en línea]. Reverté, 1983. [Consulta: 2 Marzo 2021]. Disponible en: Google-Books-ID: htRP2dHJkXgC

**YASIR, A., et al.** (2017). “Preparation and Characterization of Oligomer from Recycled PET and Evaluated as a Corrosion Inhibitor for C-Steel Material in 0.1 M HCl”. *Open Journal of Organic Polymer Materials* [en línea], 2017, 07, pp. 1-15. [Consulta: 19 Febrero 2021]. DOI 10.4236/ojopm.2017.71001. Disponible en: <https://doi.org/10.4236/ojopm.2017.71001>

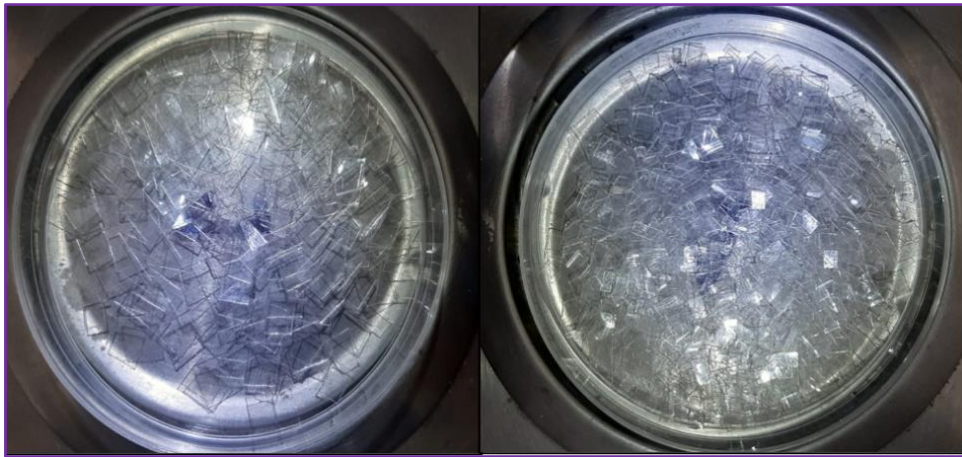
**YUE, Q. F., et al.** (2011). “Glycolysis of poly (ethylene terephthalate) (PET) using basic ionic liquids as catalysts”. *Polymer Degradation and Stability* [en línea], 2011. 96(4), pp. 399-403. [Consulta: 3 Marzo 2021]. ISSN 0141-3910. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391011000140>

## ANEXOS

### ANEXO A: SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

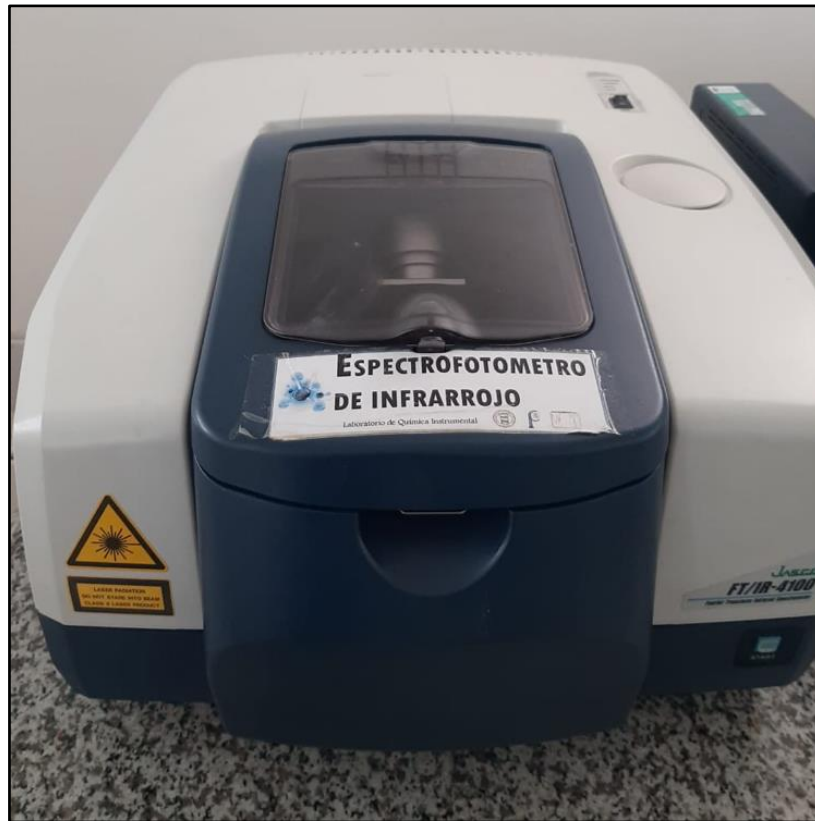


Muestras de PET



Muestras Marca DASANI

**ANEXO B: CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA Y PRODUCTOS DE GLUCÓLISIS**



Espectrofotómetro IR

## ANEXO C: CÁLCULOS REALIZADOS PARA EL PROCESO DE GLUCÓLISIS DE PET

- **Alcance de la reacción en términos de porcentaje de despolimerización**

$$X(\%) = \frac{(X_{inicial\ PET} - X_{final\ PET})}{(X_{inicial\ PET})} \times 100$$

**Datos:**

$$X_{inicial\ PET} = 4,0034 \text{ (g)}$$

$$X_{final\ PET} = 0,8534 \text{ (g)}$$

$$X(\%) = \frac{(4,0034 - 0,8534)}{(4,0034)} \times 100$$

$$X(\%) = \frac{(4,0034 - 0,8534)}{(4,0034)} = \frac{3,15}{4,0034}$$

$$X(\%) = 0,7868 * 100$$

$$X(\%) = 78,68 \%$$

- **Porcentaje de rendimiento de BHET**

$$Y(\%) = \frac{W_{BHET}}{W_{PET0}} \times 100$$

**Datos:**

$$W_{BHET} = 3,17505 \text{ (g)}$$

$$W_{PET0} = 4,0034 \text{ (g)}$$

$$Y(\%) = \frac{3,17505}{4,0034} \times 100$$

$$Y(\%) = 0,7930 * 100$$

$$Y(\%) = 79,31\%$$



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE  
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 04 / 09 / 2021

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> <i>Michele Cristina Alvarado Guilcapi</i>
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> <i>Ciencias</i>
<b>Carrera:</b> <i>Ingeniería Química</i>
<b>Título a optar:</b> <i>Ingeniera Química</i>
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

**LEONARDO  
FABIO MEDINA  
NUSTE**

Firmado digitalmente por  
LEONARDO FABIO MEDINA  
NUSTE  
Fecha: 2021.10.04 17:10:57  
-05'00'



**1519-DBRA-UTP-2021**