

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
VICERRECTORADO**

**DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA DE GAS Y
PETROQUÍMICA**



**“OBTENCIÓN DE ÁCIDO TEREFTÁLICO POR SOLVOLISIS A PARTIR DE
POLIETILENO DE TEREFTALATO EN LA CIUDAD DE EL ALTO”**

Resolución HCC N° 165/2021

EQUIPO DE INVESTIGADORES:

M.Sc. Ing. Steffi Laura Usquiano Marquez

Univ. Hebert Hilari Pacosillo

Univ. Richard Rubén Luque Poma

EL ALTO – BOLIVIA
2022

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO

AUTORIDADES

Dr. Carlos Condori Titirico
RECTOR

Dr. Efrain Chambi Vargas Ph.D
VICERRECTOR

Dr. Antonio López Andrade Ph. D.
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Ing. Nicolás Quenta Ticona
DIRECTOR DE CARRERA (a.i.) DE LA CARRERA DE INGENIERIA DE GAS Y PETROQUIMICA

REGISTRO SENAPI: Resolución Administrativa NRO. 1-2966/2022

DERECHOS RESERVADOS: Universidad Pública de El Alto

Dirección UPEA: Av. Sucre s/n Zona Villa Esperanza

Diciembre 2022
El Alto – Bolivia

PRESENTACIÓN

Tarea Irrelevante de la universidad. La Constitución Política del Estado, establece y garantiza el desarrollo de la ciencia y la investigación científica, técnica y tecnológica en beneficio del interés general. Asimismo, indica que el Estado, las universidades, las empresas productivas y de servicios, públicas y privadas, desarrollaran procesos de investigación, innovación, promoción, divulgación, aplicación y transferencia de ciencia y tecnología para fortalecer la base productiva e impulsar el desarrollo integral de la sociedad (Art. 103, numeral I, II y III); y por otra, la Universidad Pública de El Alto (UPEA) tiene constituido en su Estatuto Orgánico el Carácter Científico Institucional y tiene como misión no solamente la de formar profesionales capaces a requerimiento de la población, sino al amparo de la Ley de leyes del país tiene la de fomentar la ciencia y la investigación técnica y tecnológica para coadyuvar al desarrollo integral del país.

En el marco anterior, la UPEA expresa en su Plan Estratégico de Desarrollo Institucional PEDI, que es una necesidad la de fomentar procesos de investigación científica a nivel de la Comunidad Universitaria, promoviendo la generación de nuevos conocimientos, ciencia, desarrollo, tecnología e innovación, para un aporte inmediato y permanente al desarrollo sostenible del país. La UPEA, institución que promueve la ciencia y la investigación a través de la Dirección de Investigación Ciencia y Tecnología (DICyT) y sus Institutos de Investigaciones, en este caso particular desde el Instituto de Investigaciones de la Carrera de Ingeniería de Gas y Petroquímica, proyecta ser un brazo articulador para investigaciones que coadyuven al rol de la industria de gas y petroquímica.

Por tanto, la UPEA a través de la Carrera de Ingeniería de Gas y Petroquímica coadyuva al desarrollo del sector hidrocarburos del país, enfocados en procesos que permiten la separación primaria (gas, petróleo crudo y agua) y secundaria (deshidratación, removido de petróleo crudo, adulzamiento, criogenización), y otros procesos especializados como extracción de combustibles líquidos y otros. El

Instituto de Investigaciones de ésta carrera ha tomado muy en serio este tema de investigación y ha avanzado exitosamente el desarrollo del **proyecto “OBTENCIÓN DE ÁCIDO TEREFTÁLICO POR SOLVÓLISIS A PARTIR DE POLIETILENO DE TEREFTALATO EN LA CIUDAD DE EL ALTO”** liderada por la **Ing. Steffi Laura Usquiano Márquez** y apoyada por los auxiliares de investigación universitarios: **Richard Rubén Luque Poma y Hebert Hilari Pacosillo**, quienes en trabajo en equipo han logrado concluir la investigación de obtener ácido tereftálico por el método de solvólisis a partir de los residuos post consumo de polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto. Estos residuos a ser utilizados para la obtención de ácido tereftálico son a partir de desechos que abundan en todos los municipios y todo el país, que pueden ser aprovechados para obtener éste producto. El reciclaje químico del polietileno de tereftalato resulta ser un tema muy actual y que está en constante investigación y busca métodos diversos como en este caso la solvólisis, el cual permite volver a las materias primas para la elaboración del PET como el ácido tereftálico (TPA).

Finalmente, el proyecto pretende determinar el método solvólisis del PET más favorable y con mayor potencial para ser aplicado en las industrias, que hoy es abordado desde la universidad.

M.Sc. Ing. Nicolás Quenta Ticona
DIRECTOR a.i.
CARRERA DE INGENIERA DE GAS Y PETROQUÍMICA

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

El proyecto de investigación “Obtención de ácido tereftálico por solvólisis a partir de polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto” tiene como objetivo principal ser un aporte a la sociedad, tanto en lo académico como en lo científico, no olvidando también el aspecto humano. El tema presentado involucra mucho más que solo un análisis de laboratorio sino que muestra las sólidas intenciones del equipo de investigación en mejorar y aportar para tener una economía circular en la ciudad de El Alto. Dichos aportes serían imposibles sin la participación de personas e instituciones que han facilitado algunas actividades para que este trabajo pueda cumplir con sus objetivos. Es por ello, que me complace utilizar este espacio para para poder expresar mis agradecimientos.

Agradezco de manera especial al equipo que conforma el Instituto de Investigaciones de Ingeniería de Gas y Petroquímica, especialmente al que fue el Coordinador y ahora Director interino de la carrera de Ingeniería de Gas y Petroquímica, Ing. Nicolás Quenta, por su apoyo en todas las actividades realizadas como parte del instituto en esta gestión. También agradezco a los colegas investigadores, quienes al tener la misma línea de investigación, que es el aprovechamiento de residuos, tuvimos la oportunidad de colaborar entre nosotros en algunas ocasiones. Muchas gracias a todos ellos por hacer mucho más agradable la experiencia de este proyecto para todo el equipo de investigación.

M.Sc. Ing. Steffi Laura Usquiano Marquez
DOCENTE INVESTIGADORA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERA DE GAS Y PETROQUÍMICA

INDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCION	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.6. JUSTIFICACIÓN.....	7
1.6.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....	7
1.6.2. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA	7
1.6.3. JUSTIFICACIÓN SOCIAL	7
1.6.4. JUSTIFICACIÓN MEDIO AMBIENTAL	8
1.7. ALCANCE	8
1.7.1. ALCANCE TEMÁTICO	8
1.7.2. ALCANCE GEOGRÁFICO	8
1.7.3. ALCANCE LEGAL	9
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. MENCIÓN DE OTROS ESTUDIOS RELATIVOS AL TEMA.....	10
2.2. MENCIÓN DE LOS PUNTOS DE VISTA DE OTROS INVESTIGADORES	11
2.2.1. DESARROLLO HISTORICO DE LOS PLASTICOS	13
2.2.2. TIPOS DE LOS PLÁSTICOS.	16
2.2.2.1. TERMOFIJOS O TERMOESTABLES	17
2.2.2.2. ELASTÓMEROS.....	17
2.2.2.3. TERMOPLÁSTICOS.....	18
2.2.3. POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET)	20
2.2.3.1. SINTESIS DEL PET.....	20
2.2.3.2. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL PET.	23

2.2.4. PROCESOS DE RECICLAJE DE PET.....	24
2.2.4.1. RECICLAJE PRIMARIO	25
2.2.4.2. RECICLAJE SECUNDARIO	26
2.2.4.3. RECICLAJE TERCARIO.....	27
2.2.4.4. RECICLAJE CUATERNARIO	28
2.2.5. IMPORTANCIA DEL RECICLAJE QUIMICO.....	29
2.2.6. SOLVÓLISIS.....	30
2.2.6.1. HIDRÓLISIS.....	31
2.2.6.2. AMINOLISIS.....	35
2.2.6.3. AMONÓLISIS.....	36
2.2.6.4. METANÓLISIS	37
2.2.6.5. GLICÓLISIS	39
2.2.7. PRODUCTOS OBTENIDOS POR SOLVÓLISIS DEL PET	40
2.2.8. ACIDO TEREFTALICO (TPA).....	41
2.2.8.1. PROPIEDADES FISICAS DEL ACIDO TEREFTALICO	42
2.2.8.2. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ACIDO TEREFTALICO	43
2.2.8.3. CARACTERISTICAS TÉCNICAS DEL ACIDO TEREFTALICO	44
2.2.8.4. APLICACIONES DEL ACIDO TEREFTALICO	45
2.2.9. GENERACION DE RESIDUOS SOLIDOS EN LA CIUDAD DE EI ALTO	46
2.2.9.1. RECICLAJE DE PET EN LA CIUDAD DE EL ALTO.....	48
2.2.10. RECICLAJE QUIMICO Y ECONOMIA CIRCULAR	49
2.2.11. NORMATIVA VIGENTE RELACIONADA AL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	51
2.3. ENFOQUE ELEGIDO POR EL INVESTIGADOR	54
2.4. IDENTIFICACION DE LAS FUENTES	54
CAPITULO 3. MARCO METODOLÓGICO	56
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	56
3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	56
3.3. VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN	57

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	59
3.5. AMBIENTE DE LA INVESTIGACIÓN.....	60
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	61
3.7. PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	63
CAPITULO 4. RESULTADOS.....	64
4.1. GENERACION DE RESIDUOS PET EN LA CIUDAD DE EL ALTO	65
4.2. PERCEPCION SOBRE EL RECICLAJE DE RESIDUOS PET EN LA CIUDAD DE EL ALTO	67
4.2.1. ENCUESTA VIRTUAL “RECICLAJE DE RESIDUOS PET EN EL ALTO”	68
4.2.1.1. RESULTADOS ENCUESTA VIRTUAL.....	68
4.2.1.2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN OBTENIDA DE LA ENCUESTA.....	76
4.2.1.3. CONCLUSIONES DE LA ENCUESTA VIRTUAL “RECICLAJE DE RESIDUOS PET EN LA CIUDAD DE EL ALTO”	79
4.3. SESIONES EXPERIMENTALES EN LABORATORIO	81
4.3.1. RECOLECCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA	83
4.3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	84
4.3.3. HIDRÓLISIS NEUTRA – SESION LABORATORIO	89
4.3.3.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL HIDROLISIS NEUTRA	90
4.3.3.2. CALCULOS RENDIMIENTO DE LA REACCION DE HIDRÓLISIS NEUTRA DE PET	93
4.3.3.3. DISCUSIÓN DE LA PRÁCTICA DE HIDROLISIS NEUTRA.....	97
4.3.3.4. CONCLUSIONES DE LA PRACTICA DE HIDROLISIS NEUTRA DEL PET	98
4.3.4. HIDROLISIS BASICA – SESION LABORATORIO	98
4.3.4.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL HIDROLISIS BASICA.....	100
4.3.4.2. CALCULOS RENDIMIENTO DE LA REACCION DE HIDRÓLISIS BASICA DE PET.....	108
4.3.4.3. DISCUSIÓN DE LA PRÁCTICA DE HIDROLISIS ALCALINA	114
4.3.4.4. CONCLUSIONES DE LA PRACTICA DE HIDROLISIS ALCALINA DEL PET	116

4.3.5. HIDROLISIS ÁCIDA – SESION LABORATORIO	117
4.3.5.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL HIDROLISIS ÁCIDA.....	118
4.3.5.2. CALCULOS RENDIMIENTO DE LA REACCION DE HIDRÓLISIS ÁCIDA DE PET	122
4.3.5.3. DISCUSIÓN DE LA PRÁCTICA DE HIDROLISIS ÁCIDA	125
4.3.5.4. CONCLUSIONES DE LA PRACTICA DE HIDROLISIS ACIDA DEL PET	127
4.3.6. IDENTIFICACIÓN DEL ÁCIDO TEREFTALICO OBTENIDO EN CADA TIPO DE HIDRÓLISIS.....	127
4.3.7. ANALISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE SOLVÓLISIS REALIZADOS	129
4.3.7.1. POTENCIAL ECONOMICO DEL METODO DE HIDROLISIS BASICA CON ETANOL COMO SOLVENTE PARA TRATAR LOS RESIDUOS PET EN LA CIUDAD DE EL ALTO	134
4.4. VALIDACION DE LA HIPOTESIS DE INVESTIGACION.....	138
4.5. PARTICIPACION DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN EN FERIAS CIENTIFICAS.....	140
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	145
CAPITULO 6. RECOMENDACIONES.....	147
BIBLIOGRAFÍA	148
ANEXOS.....	153

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de Ishikawa de la problemática de falta de investigación en el reciclaje químico por solvólisis en la ciudad de El Alto.....	5
Figura 2.1 Cronología de los plásticos del siglo XIX al XXI	14
Figura 2.2 Clasificación de los Plásticos.....	16
Figura 2.3 Termoestables	17
Figura 2.4 Elastómeros	18
Figura 2.5 Termoplásticos.....	18
Figura 2.6 Código de Identificación de Resinas.....	19
Figura 2.7 Polietileno de Tereftalato (PET).....	20
Figura 2.8 Síntesis de PET por vía TPA y EG.	21
Figura 2.9 Síntesis de PET utilizando la ruta DMT y EG.	22
Figura 2.10 Pasos que involucran el Reciclaje Mecánico de PET	26
Figura 2.11 Circularidad del reciclaje químico del PET	30
Figura 2.12 Hidrólisis alcalina de PET usando NaOH o KOH	32
Figura 2.13 Despolimerización de PET usando H ₂ SO ₄	34
Figura 2.14 Aminólisis de PET	36
Figura 2.15 Amonólisis de PET	37
Figura 2.16 Metanólisis de PET	38
Figura 2.17 Glicólisis de PET	39
Figura 2.18 Productos de diferentes formas de solvolisis de PET	40
Figura 2.19 Estructura molecular ácido Tereftálico.	41
Figura 2.20 Aspecto físico de Ácido Tereftálico.....	42
Figura 2.21 Aplicaciones comunes del ácido tereftálico purificado	45
Figura 2.22 Clasificación de los residuos sólidos generados en la ciudad de El Alto	47
Figura 2.23 Reciclaje Químico de Plásticos en la Economía Circular.....	50
Figura 3.1 Esquema metodológico de la investigación.....	63
Figura 4.1 Distritos de la ciudad de El Alto	64
Figura 4.2 Número de viviendas, por forma de eliminación de la basura.....	65

Figura 4.3 Gráfico de edades promedio de los encuestados	69
Figura 4.4 Gráfico Sexo de personas encuestadas	69
Figura 4.5 Ejemplos de envases PET y como reconocerlos, mostrados en la encuesta	70
Figura 4.6 Grafico conocimiento sobre la codificación PET	71
Figura 4.7 Grafico frecuencia con la que utiliza el PET	72
Figura 4.8 Grafico que hace con los residuos PET	72
Figura 4.9 Grafico conciencia sobre el reciclaje de PET en su medio	73
Figura 4.10 Grafico conocimiento sobre los envases PET recolectados	74
Figura 4.11 Grafico conocimiento sobre otras formas de reciclaje de PET	75
Figura 4.12 Algunas de las respuestas sobre alternativas de reciclaje de PET....	76
Figura 4.13 Métodos por solvólisis y productos generados.....	81
Figura 4.14 Casos de envases PET a estudiar en laboratorio	83
Figura 4.15 PET triturados para análisis en laboratorio.....	83
Figura 4.16 Diagrama de bloques – Hidrolisis Neutra	90
Figura 4.17 Armado de Kit de destilación simple en laboratorio IGP	91
Figura 4.18 Proceso de Hidrolisis Neutra en laboratorio IGP	92
Figura 4.19 Acido Tere ftálico obtenido por Hidrolisis Neutra.....	93
Figura 4.20 Diagrama de bloques – Hidrolisis Alcalina	100
Figura 4.21 Reactivos a utilizar para la hidrolisis alcalina de PET con Agua	101
Figura 4.22 Degradación de PET sobre la plancha de calentamiento	102
Figura 4.23 Tereftalato de sodio obtenido por la degradación por hidrolisis alcalina	102
Figura 4.24 Separación del PET que no ha reaccionado	103
Figura 4.25 Formación del ácido tereftalico por adición de ácido sulfúrico	103
Figura 4.26 Neutralización de la solución acida y posterior filtración	104
Figura 4.27 Acido tereftalico obtenido por hidrolisis básica con Agua	104
Figura 4.28 Reactivos a utilizar para la hidrolisis básica del PET con etanol	105
Figura 4.29 Degradación del PET con una solución de NaOH y Etanol	106
Figura 4.30 PET no reaccionado filtrado, del caso 5, botella Ámbar.....	106

Figura 4.31 Neutralización de la solución de ácido sulfúrico y posterior filtración	107
Figura 4.32 Acido Tereftalico seco en los papeles filtro	107
Figura 4.33 Diagrama de bloques – Hidrolisis Ácida	119
Figura 4.34 Mezcla de solución de ácido sulfúrico al 7.5M con PET	119
Figura 4.35 PET triturado y solución de ácido sulfúrico al 7.5M en la plancha de calentamiento	120
Figura 4.36 Casos estudiados luego de la reacción de hidrolisis acida	120
Figura 4.37 Filtrado de Ácido tereftalico de la solución neutralizada con NaOH	121
Figura 4.38 Acido Tereftalico obtenido por Hidrolisis Acida	122
Figura 4.39 Identificación del Ácido carboxílico con Bicarbonato de Sodio de cada caso estudiado	128
Figura 4.40 Formación de Dióxido de carbono por adición de Bicarbonato de sodio para los tres métodos de hidrolisis aplicados	129
Figura 4.41 Grafico Temperatura vs. Tiempo de los métodos de solvolisis aplicados	132
Figura 4.42 Equipo de Investigación en el stand designado para la presentación del proyecto en la VI Expo ciencia Área Ciencia y Tecnología 2022	141
Figura 4.43 Exposición del proyecto en la VI Expo ciencia Área Ciencia y Tecnología 2022 ante los jurados evaluadores	141
Figura 4.44 Exposición del proyecto VI Expo ciencia Área Ciencia y Tecnología 2022 ante visitantes interesados al stand.....	142
Figura 4.45 Acto de Premiación a los primeros lugares de la VI Expo ciencia Área Ciencia y Tecnología 2022.....	142
Figura 4.46 Equipo de Investigación en el stand designado para la presentación del proyecto en la Feria Institucional de la UPEA 2022.....	143
Figura 4.47 Exposición del proyecto en la Feria Institucional UPEA 2022 ante jurados evaluadores	143
Figura 4.48 Exposición del proyecto en la Feria Institucional UPEA 2022 ante estudiantes interesados en el tema	144

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades del PET	24
Tabla 2.2 Ventajas y desafíos de las técnicas de reciclaje de PET	29
Tabla 2.3 Solubilidad del ácido tereftálico en solventes.....	43
Tabla 2.4 Especificaciones técnicas del ácido tereftálico grado polímero	44
Tabla 2.5 Empresas de envases PET en Bolivia	49
Tabla 3.1 Definición de variables de investigación	58
Tabla 4.1 Pesos Anuales de Residuos Sólidos generados en la ciudad de El Alto	66
Tabla 4.2 Peso de residuos de Polietileno de Tereftalato en la ciudad de El Alto en 2021.....	67
Tabla 4.3 Distrito de la ciudad de El Alto al que pertenecen los encuestados	70
Tabla 4.4 Análisis de respuestas obtenidas en la encuesta “Reciclaje de residuos PET en la ciudad de El Alto	77
Tabla 4.5 Tipos de envases PET a estudiar en laboratorio	82
Tabla 4.6 Descripción de las características generales de la materia prima a utilizar en laboratorio	84
Tabla 4.7 Temperatura de punto de fusión de los casos estudio	85
Tabla 4.8 Densidad de los casos estudio de PET usando distintos disolventes ...	86
Tabla 4.9 Solubilidad de los casos estudio de PET usando distintos disolventes.	87
Tabla 4.10 Comportamiento a la llama de los casos estudiados de envases PET	88
Tabla 4.11 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 1	94
Tabla 4.12 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 2	95
Tabla 4.13 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 3	95
Tabla 4.14 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 4	96
Tabla 4.15 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 5	96
Tabla 4.16 Casos de reciclaje químico y sus respectivos rendimientos por hidrolisis neutra (%).....	97
Tabla 4.17 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 1	108

Tabla 4.18 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 2	109
Tabla 4.19 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 3	109
Tabla 4.20 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 4	110
Tabla 4.21 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 5	110
Tabla 4.22 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 1	111
Tabla 4.23 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 2	111
Tabla 4.24 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 3	112
Tabla 4.25 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 4	112
Tabla 4.26 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 5	113
Tabla 4.27 Casos de reciclaje químico y sus respectivos rendimientos por hidrolisis alcalina con agua y con etanol (%)	113
Tabla 4.28 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 1	122
Tabla 4.29 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 2	123
Tabla 4.30 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 3	123
Tabla 4.31 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 4	124
Tabla 4.32 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 5	124
Tabla 4.33 Casos de reciclaje químico y sus respectivos rendimientos por hidrolisis acida (%)	125
Tabla 4.34 Resumen de los métodos realizados en laboratorio	130
Tabla 4.35 Evaluación de las ventajas y desventajas de los métodos de hidrolisis	133
Tabla 4.36 Precios de reactivos y producto para el reciclaje químico de PET	135
Tabla 4.37 Inversión necesaria en reactivos para producir ácido tereftalico (TPA)	136
Tabla 4.38 Costo Acido Tereftalico producido de los residuos PET generados al año en El Alto	138
Tabla 4.39 Validación de la Hipótesis de investigación en los métodos de solvolisis realizados	139

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1	Ecuación para cálculo de tamaño de muestra finita.....	59
Ecuación 4.1	Ecuación de cálculo de peso de residuos PET en El Alto en 2021.....	67
Ecuación 4.2	Ecuación para el cálculo de rendimiento	93
Ecuación 4.3	Rendimiento de la reacción del reciclaje químico de PET	93
Ecuación 4.4	Ecuación para cálculo de moles de ácido tereftálico.....	94
Ecuación 4.5	Ecuación para cálculo de moles de PET	94
Ecuación 4.6	Ecuación general para cálculo de rendimiento de reacción	94

RESUMEN

El reciclaje mecánico del PET, es el método más ampliamente utilizado alrededor del mundo, el cual permite obtener resina PET reciclada, sin embargo, algunas propiedades de esta resina PET reciclada mecánicamente son inferiores a la de una resina PET virgen, por lo cual en la mayoría de los casos, esta resina suele ser mezclada con resina nueva o virgen de PET, continuando así, con la dependencia de resinas nuevas de PET de origen fósil. Además el reciclaje mecánico presenta algunas limitaciones para tratar determinados envases de PET, como es el caso de los envases PET de color, los cuales suelen ser relegados o rechazados en las plantas de reciclaje mecánico.

Es por ello que si bien el reciclaje mecánico es una opción importante de reciclaje, es necesario explorar e investigar más sobre otras opciones de reciclaje de este tipo de material, como es el caso del reciclaje químico de PET, el cual es el tipo de reciclaje que va más acorde a los principios de desarrollo sostenible y economía circular, debido a que permite volver a las materias primas, las cuales pueden ser utilizadas con la misma eficiencia que una materia prima virgen, produciendo diversos productos de buena calidad.

En el presente proyecto de investigación, se tiene como objetivo principal obtener ácido tereftálico por el método de solvólisis a partir de los residuos post consumo de polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto, para ello se estudia los principios del método de solvolisis, determinando a la hidrolisis como la forma directa de obtener ácido tereftalico. Asi mismo se concluye que el método de solvolisis por hidrolisis básica con etanol como solvente es aquella que tiene mayor potencial para ser aplicada a futuro en la ciudad de El Alto, debido a que opera a presión atmosférica y moderadas temperaturas, no requiere de un tiempo de degradación prolongado y sobre todo logra cumplir la hipótesis del trabajo de investigación con rendimientos mayores al 51% en 4 de los 5 casos estudio de envases PET evaluados en el proyecto de investigación.

ABSTRACT

The mechanical recycling of PET is the most widely used method around the world, which allows obtaining recycled PET resin, however, some properties of this mechanically recycled PET resin are inferior to those of a virgin PET resin, for which in the In most cases, this resin is usually mixed with new or virgin PET resin, thus continuing the dependence on new PET resins of fossil origin. In addition, mechanical recycling presents some limitations to treat certain PET containers, as is the case of colored PET containers, which are usually relegated or rejected in mechanical recycling plants.

That is why, although mechanical recycling is an important recycling option, it is necessary to explore and investigate more about other recycling options for this type of material, such as the case of chemical recycling of PET, which is the type of recycling which is more in line with the principles of sustainable development and circular economy, because it allows returning to raw materials, which can be used with the same efficiency as virgin raw material, producing various good quality products.

In this research project, the main objective is to obtain terephthalic acid by the solvolysis method from post-consumer polyethylene terephthalate waste in the city of El Alto, for which the principles of the solvolysis method are studied, determining to hydrolysis as the direct way to obtain terephthalic acid. Likewise, it is concluded that the solvolysis method by basic hydrolysis with ethanol as a solvent is the one that has the greatest potential to be applied in the future in the city of El Alto, because it operates at atmospheric pressure and moderate temperatures, it does not require a time. of prolonged degradation and above all it manages to fulfill the hypothesis of the research work with yields greater than 51% in 4 of the 5 study cases of PET containers evaluated in the research project.

CAPITULO 1. INTRODUCCION

En la actualidad, los materiales plásticos se han vuelto indispensables para la humanidad, siendo muy utilizados para diversas aplicaciones alrededor del mundo. Sin embargo el consumismo elevado de estos productos ha dado como resultado un incremento en la generación de residuos plásticos, lo cual constituye un tema de gran preocupación, que involucra debates en las sociedades, así como en entidades académicas como la Universidad Pública de El Alto, la cual a través de sus institutos de investigaciones busca como poder participar en la construcción, difusión y aplicación del conocimiento para así ser parte de la solución de este tipo de problemáticas mediante la investigación.

Uno de los artículos de plástico más utilizados en la actualidad son la muy conocidas botellas o envases PET, las siglas PET hacen referencia a su nombre, polietileno de tereftalato, el cual es un tipo de plástico comúnmente utilizado en envases y botellas de gaseosa, agua y aceite, entre otros. El PET es un producto que se obtiene a partir de reacciones de poli condensación de dos materias primas principales, ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG), ambas provenientes del petróleo, y corresponde a un poliéster aromático termoplástico, lo cual lo hace apto para ser transformado mediante proceso de extrusión, inyección-soplado y termoformado. (Bellis, 2020)

Dada la versatilidad del PET, su uso es muy amplio, de modo que la generación de residuos de este tipo de material también ha crecido vertiginosamente, lo cual constituye un problema tal que obliga a los países a desarrollar políticas de reciclado. Sin embargo, se ha observado que la efectividad del reciclaje de este tipo de materiales está sujeto a tres características: el método de reciclaje, la calidad del PET y la cantidad a reciclar. El PET se puede reciclar de manera mecánica, química y energética, y en el presente trabajo de investigación, el enfoque será en el reciclaje químico, el cual resulta el más conveniente de acuerdo con los principios de desarrollo sostenible, por el método de solvólisis del PET, planteando una forma de

reciclaje del PET en la ciudad de El Alto para obtener ácido tereftálico o TPA, que es uno de los insumos necesarios para producir resina PET virgen y otros productos.

1.1. ANTECEDENTES

Según un informe de 2016 de la Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), los desechos plásticos suelen ser una mezcla de PET, polietileno de alta densidad, polietileno de baja densidad, polipropileno, poliestireno, cloruro de polivinilo, acrilonitrilo butil estireno, nailon, teflón y plástico reforzado con fibra. Es por ello que la recuperación de material y energía de los residuos generados se considera una solución viable al problema del aumento de la cantidad de residuos plásticos, también como un paso hacia el desarrollo sostenible en las sociedades modernas. (USEPA, 2016)

De acuerdo a informes del Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia, más del 70% de los residuos generados en Bolivia provienen exclusivamente de las 9 ciudades capitales y El Alto. Y de estos residuos sólidos generados a nivel nacional, la fracción orgánica representa el 55,2%, la fracción reciclable (papel, plástico y vidrio) el 22,1%, y el 22,7% se considera como residuos no aprovechables. Lo que significa que aproximadamente 75% de los residuos generados en el país, podrían ser aprovechados. Desafortunadamente, de ese 75% que se podría aprovechar solo se recicla el 4%. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2012).

En la ciudad de El Alto, la empresa encargada en la actualidad de la recolección de residuos es la Empresa TREBOL, la cual recolecta al mes aproximadamente 20.000 toneladas de residuos, de los cuales se indica que la composición es de: orgánicos, 66%; plásticos, 10%, papel 5%, vidrio 2%, metales, 2% y otros, 15%. (Dirección de Gestión Integral de Residuos, 2022). Al igual que en el resto del país, la población alteña en su mayoría no desecha de manera diferenciada sus residuos para así promover el reciclaje de los mismos, ya que más del 50% de la población en el 2012, fecha de último censo, indica que desecha sus residuos en los contenedores de basura públicos sin ningún tipo de separación por tipo de material. (Instituto Nacional de Estadística, 2012)

Entre los residuos que más preocupan por su acumulación en la ciudad de El Alto, se tienen a los plásticos, es por ello que han surgido diversos trabajos que pretenden proponer soluciones, para motivar y promover el reciclaje de plásticos como el PET en ésta ciudad, entre ellos se puede mencionar los siguientes:

En 2014, se elabora un proyecto de grado en la carrera de Electromecánica de la Universidad Mayor de San Andrés, denominado “Diseño de una maquina extrusora de plásticos PET”, el cual tiene un enfoque más técnico referido a uno de los equipos esenciales para obtener los denominados pellets como producto final de reciclaje mecánico del PET. (Morales Salgueiro, 2014)

También en el 2014, se elabora un proyecto de grado en la carrera de Arquitectura de la Universidad Mayor de San Andrés titulado “Modelo de planta recicladora de botellas PET ciudad de El Alto”, el cual pretende crear un modelo de infraestructura de una planta recicladora de PET con un enfoque más arquitectónico de diseño de instalaciones de planta que en el proceso de reciclaje mecánico en sí. (Tarqui Zabala, 2014)

En 2015, se elabora un proyecto de grado de la carrera de Química Industrial de la Universidad Mayor de San Andrés titulado “Estudio de un proceso tecnológico para el reciclaje de botellas PET”, el cual tiene un enfoque relacionado a optimizar el proceso de reciclaje mecánico del PET en la ciudad de El Alto. (Patzí Canaza, 2015)

En el año 2021, en la carrera Ingeniería de Gas y Petroquímica de la Universidad Pública de El Alto, se desarrolló el proyecto titulado: “Sistema de Reciclaje a partir de residuos post consumo de tereftalato de polietileno en la zona de Villa Ingenio”, como parte de uno de los proyectos llevados por el instituto de investigación de la misma carrera esa gestión. En este proyecto se tuvo un enfoque más dirigido a la elaboración de un sistema de recolección de este tipo de residuos para que éstos sean llevados con mayor practicidad a empresas de reciclaje mecánico de la ciudad. También se quiso evaluar otros tipos de reciclaje como el químico, evaluando de manera básica el reciclaje químico por hidrólisis básica del PET. (Usquiano Marquez, Siñani Chavez, & Quispe Alejo, 2021)

Desafortunadamente, una gran mayoría de trabajos basados en el reciclaje de PET en la ciudad de El Alto, hacen más referencia al reciclaje mecánico del PET, evidenciando así que el estudio de otras formas de reciclaje de este tipo de plástico, como el reciclaje químico o reciclaje energético, no son áreas muy exploradas por investigadores nacionales. Es por ello que el presente trabajo de investigación se considera relevante y de aporte considerable a la comunidad estudiantil y a la sociedad, ya que pretende estudiar el reciclaje químico del PET para la obtención de ácido tereftálico por el método de solvólisis en la ciudad de El Alto.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El PET (polietileno de tereftalato) es uno de los materiales más comúnmente utilizados en la industria embotelladora y de embalaje debido a las grandes ventajas y comodidades que implica su uso, sin embargo una realidad es que una vez que este material se convierta en un residuo, éste se termina acumulando de manera alarmante en los rellenos sanitarios, botaderos y en algunos casos en vías públicas, ríos, lagos, etc. en distintas partes del país, es por ello que es necesario reciclar este tipo de residuo para que nuevamente forme parte de la economía y así promover un desarrollo sustentable en la ciudad de El Alto.

El tipo de reciclaje más aplicado en la actualidad es el reciclaje mecánico del PET, que ayuda a obtener resina PET reciclada, sin embargo, algunas propiedades de esta resina PET reciclada mecánicamente son inferiores a la de una resina PET virgen, por lo cual en la mayoría de los casos, esta resina suele ser mezclada con resina nueva o virgen de PET, continuando con la dependencia de resinas PET de origen fósil. Además el reciclaje mecánico presenta algunas limitaciones para tratar determinados envases de PET, como es el caso de los envases PET de color, los cuales suelen ser relegados o rechazados en las plantas de reciclaje mecánico.

Es por ello que si bien el reciclaje mecánico es una opción importante de reciclaje, es necesario explorar e investigar más sobre otras opciones de reciclaje de este tipo de material, como es el caso del reciclaje químico de PET, el cual es el tipo de reciclaje que va más acorde a los principios de desarrollo sostenible y economía

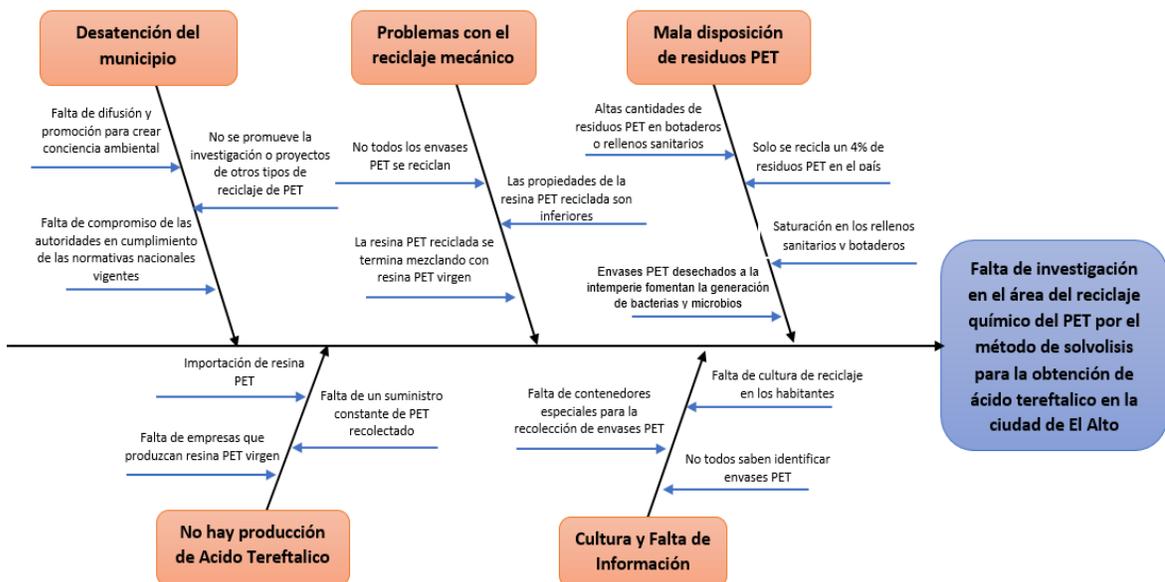
circular, debido a que permite volver a las materias primas, las cuales pueden ser utilizadas con la misma eficiencia que una materia prima virgen.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El reciclaje mecánico de residuos post consumo de polietileno de tereftalato (PET) es el que más se aplica en la ciudad de El Alto, sin embargo el que sea el más aplicado no significa que sea el más eficiente. Debido a esto, es que existe la necesidad de investigar más sobre otros tipos de reciclaje con gran potencial como el reciclaje químico del PET por el método de solvólisis, el cual permitiría obtener nuevamente la materia prima, como el ácido tereftálico, y con ello la posibilidad de elaborar envases PET nuevamente, además de ser una opción para casos donde no se puede aplicar el reciclaje mecánico de PET.

A continuación, se realiza un resumen de las causas que aportan a la problemática principal del presente trabajo de investigación.

Figura 1.1 Diagrama de Ishikawa de la problemática de falta de investigación en el reciclaje químico por solvólisis en la ciudad de El Alto.



Fuente: Elaboración propia, 2022

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener ácido tereftálico por el método de solvólisis a partir de los residuos post consumo de polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar el estado del arte referente a los tipos de reciclaje de polietileno de tereftalato y métodos de solvólisis para producir ácido tereftálico.
- Recopilar información sobre los residuos post consumo de polietileno de tereftalato generados anualmente en la ciudad de El Alto para evaluar su potencialidad como materia prima en la producción de ácido tereftálico.
- Desarrollar la práctica experimental en laboratorio del reciclaje químico del PET por el método de solvólisis como opción para reciclar los envases PET en la ciudad de El Alto.
- Determinar el método de solvólisis del PET más favorable y con mayor potencial para ser aplicado en la ciudad de El Alto.

1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

El municipio de El Alto, al igual que muchos municipios del país, genera una gran cantidad de residuos plásticos como el polietileno de tereftalato (PET). Algunos de estos residuos PET son sometidos al reciclaje mecánico, el cual es el método de reciclaje más común en nuestro país. Sin embargo se ha identificado que esta forma de reciclaje no resulta ser la más eficiente, ya que no cumple a cabalidad los principios de circularidad, permitiéndonos obtener una resina reciclada de PET con propiedades inferiores a una resina PET virgen o nueva. El reciclaje químico del polietileno de tereftalato resulta ser un tema muy actual y que está en constante investigación, presentando métodos como el de solvólisis, el cual nos permite volver a las materias primas para la elaboración del PET, como el ácido tereftálico (TPA). Es por ello que la hipótesis del presente proyecto de investigación es la siguiente:

Hi: El reciclaje químico de residuos post consumo de polietileno de tereftalato por el método de solvólisis, permite recuperar ácido tereftálico con un rendimiento de conversión del polímero a monómeros, igual o superior al 51%, proyectándose como una opción más de reciclaje de residuos PET generados en la ciudad de El Alto.

1.6. JUSTIFICACIÓN

1.6.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

El reciclaje químico del PET es el método menos utilizado pero el más prometedor, no está implantado a escala comercial pero es útil para los plásticos que no pueden ser reciclados mecánicamente. Además la optimización de este método puede permitir recuperar cualquier tipo de plástico y convertirlo en materia prima de primera calidad.

Los beneficios del reciclaje químico del PET incluyen una mejor gestión de los residuos plásticos, la reutilización de los polímeros, ahorro de energía, trabajo, y ser una alternativa para solucionar limitaciones del reciclado mecánico como es el caso del reciclaje de envases PET de color.

1.6.2. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

El reciclaje químico de residuos post consumo de polietileno de tereftalato (PET) es importante también en aspectos económicos, ya que se ahorra materia prima y se pueden motivar a la generación de nuevas fuentes de negocio. En Bolivia, más de 10000 familias trabajan recuperando y recolectando residuos sólidos, y el 60% de ellas son mujeres que sustentan a su familia mediante la recolección de materiales reciclables. Poder desarrollar más tipos de reciclaje de residuos PET, como el reciclaje químico por solvolisis, fomentaría el reciclaje y haría más atractivo el negocio de recolección de residuos PET.

1.6.3. JUSTIFICACIÓN SOCIAL

La mala disposición de los residuos sólidos, como los plásticos en la ciudad de El Alto, es reflejo de lo que sucede en diversas ciudades de Bolivia, es la

representación de la falta de la cultura e información acerca del reciclaje en la población, para ello es necesario fomentar y poner en conocimiento de las personas las diversas formas posibles de reciclaje de PET, orientando a jóvenes y adultos para que con el tiempo ellos puedan demostrar actitudes responsables con el medio ambiente y su entorno, que contribuyan al mejor desarrollo de la ciudad de El Alto.

1.6.4. JUSTIFICACIÓN MEDIO AMBIENTAL

Considerar la opción de dejar de producir y utilizar productos elaborados de PET como una solución no es realista. El polietileno de tereftalato (PET) es un material que facilita la vida del ser humano en varias aplicaciones, así que la intención es encontrar alternativas que permitan mitigar el impacto negativo que los residuos post consumo de PET generan en el medio ambiente, además de encontrar maneras de aprovechar estos residuos para la obtención de otras sustancias importantes como el ácido tereftálico y así coadyuvar a la disminución de la acumulación de plástico en la ciudad de El Alto.

1.7. ALCANCE

1.7.1. ALCANCE TEMÁTICO

El objetivo de la investigación es obtener ácido tereftálico por el método de solvólisis a partir de los residuos post consumo de polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto, y así poder demostrar que aparte del reciclaje mecánico, existen otras opciones que resultan ser más eficientes para reciclar el PET, permitiéndonos obtener un insumo muy importante como es el ácido tereftálico, el cual es ampliamente usado para la fabricación de envases PET y en la industria farmacéutica. El reciclaje químico por el método de solvólisis está acorde a los principios de desarrollo sustentable para proteger el medio ambiente y mejorar la calidad de vida de los habitantes del mundo.

1.7.2. ALCANCE GEOGRÁFICO

El análisis de la obtención de ácido tereftálico por el método de solvólisis será a escala laboratorio, sin embargo para el presente trabajo de investigación se

realizara un estudio de la cantidad de residuos post consumo de polietileno de tereftalato que se generan en la ciudad de El Alto, para así poder evaluar una posible potencialidad como ciudad para suministrar materia prima aprovechable para la obtención de ácido tereftálico mediante reciclaje químico.

1.7.3. ALCANCE LEGAL

En la Constitución Política del Estado promulgada el 7 de febrero del 2009, en el artículo 299, menciona que los residuos industriales y tóxicos, así como proyectos de agua potable y tratamiento de residuos sólidos son competencias que se ejercen de forma concurrente por el nivel central de Estado y las entidades territoriales autónomas. La ley 755 promulgada el 28 de octubre del 2015, establece la política general y el régimen jurídico de la Gestión Integral de Residuos en el Estado Plurinacional de Bolivia, priorizando la prevención para la reducción de la generación de residuos, su aprovechamiento y disposición final sanitaria y ambientalmente segura, en el marco de los derechos de la Madre Tierra, así como el derecho a la salud y a vivir en un ambiente sano y equilibrado.

El presente proyecto de investigación respetara las normativas vigentes existentes relacionadas al tema de investigación y se basara en las mismas para su desarrollo.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. MENCIÓN DE OTROS ESTUDIOS RELATIVOS AL TEMA

En el anterior capítulo se citó algunos trabajos desarrollados en el país sobre el reciclaje del polietileno de tereftalato (PET), observando que todos éstos tienen un enfoque dirigido al reciclaje mecánico de PET. Sin embargo, el enfoque del presente trabajo de investigación está en el reciclaje químico de PET para obtener ácido tereftálico, y para ello se tuvo que recurrir a la revisión de trabajos relacionados al tema proveniente de otros países.

Existen diversos estudios sobre la obtención de ácido tereftálico a partir de residuos de polietileno de tereftalato (PET) alrededor del mundo, sin embargo solo se mencionara en esta sección aquellos que fueron tomados como referencia en el presente trabajo de investigación, como se muestra a continuación.

En el 2012, se desarrolla el artículo científico titulado “Reciclaje Químico de desechos Plásticos”, en el cual se estudia la despolimerización de tres plásticos comunes en los desechos domésticos, entre ellos el PET, el policarbonato y el Nylon 6. Para cada tipo de polímero se estudia las condiciones despolimerización en sesiones experimentales y así determinar la potencialidad para ser fuente de materia prima. (Elgegren, y otros, 2012)

En el 2012, se desarrolla un artículo científico denominado “Recent Developments in the Chemical Recycling of PET”, en el cual ya se tenían avances importantes relacionados al tema, estudiando métodos de degradación del PET y el impacto de nuevas tecnologías para futuros estudios. (Bartolome L. , Imran, Gyoo Cho, Al-Masry, & Hyun Kim, 2012)

En el 2019, se desarrolló el trabajo de investigación titulado: “Valoración de métodos químicos para obtener ácido tereftálico a partir del tereftalato de polietileno PET”, en el cual se evaluó al menos cinco tipos de despolimerización química, como la Hidrolisis, Glicólisis, Metanolisis, Aminolisis y Amonolisis, logrando obtener ácido tereftálico, BHET, DMT, BHETA y tereftalamida, que son resinas que pueden ser

usadas en procesos posteriores como materia prima para ser reintroducidas en la síntesis del PET o a su vez elaborar un nuevo material. (Guapisaca Siguenza & Pintado Barbecho, 2019)

En el 2019, se desarrolla el trabajo de investigación titulado “Análisis de Reciclado químico de plásticos (PE y PET) para la Obtención de Productos con Valor Agregado en México”, en el cual se estudia algunas posibilidades para el reciclado del PET y PE, desde el punto de vista de implementar una economía circular, a fin de encontrar una alternativa factible y ajustada a la problemática en México, reafirmando a su vez el gran potencial del reciclaje químico de plásticos, el cual tienen la ventaja de obtención de materias primas orgánicas que posteriormente pueden ser usadas para producir nuevos plásticos entre otros. (Vargas Santillán, 2019)

2.2. MENCIÓN DE LOS PUNTOS DE VISTA DE OTROS INVESTIGADORES

De todos los trabajos mencionados anteriormente, todos los investigadores concluyen en la importancia de la investigación del tópico del reciclaje químico de plásticos como el PET, para ser solución a la problemática actual de la acumulación de este tipo de residuos en diferentes ciudades del mundo.

Vargas Santillán, autor del trabajo “Análisis de Reciclado químico de plásticos (PE y PET) para la Obtención de Productos con Valor Agregado en México”, procura proponer soluciones para lidiar con la problemática de acumulación de residuos plásticos desde el enfoque de llegar a una economía circular, entendiendo que el reciclaje químico es la forma más efectiva de cumplir con los principios de sostenibilidad.

Por otro lado, Elgegren, Bartolome, Guapisaca Sanguenza, et al., autores de los demás trabajos de investigación citados, tienen un enfoque más técnico y enfocado en los métodos de degradación del PET, como la solvolisis, y la evaluación de los productos químicos de alto valor que pueden ser recuperados por medio de este reciclaje.

Los enfoques de otros investigadores han servido como referencia para el desarrollo del presente trabajo de investigación, en el cual también se hace la revisión del estado del arte referente al polietileno de tereftalato y sus formas de reciclaje, así como de los métodos de solvolisis disponibles en la actualidad para la obtención de ácido tereftálico. Es por ello, que a continuación, se amplían conceptos básicos e importantes recopilados de fuentes fiables que sustentan el trabajo realizado en la presente investigación.

Desde la creación de los primeros polímeros sintéticos en el siglo XX, los plásticos se han convertido en un material esencial en las actividades humanas debido a sus valiosas características, tales como su bajo costo de producción y amplias aplicaciones potenciales. Se estima que cada año se producen 370 mil millones de toneladas de materiales plásticos, una tendencia que no se espera disminuir en los próximos años (Geyer, Jambeck, & Law, 2017). Los plásticos son muy elogiados debido a la facilidad de su producción y diversidad de aplicaciones gracias a sus propiedades de durabilidad, robustez, y aligeramiento, que son inigualables por otras categorías de materiales que se tienen en la actualidad.

Aunque se estima que existen 60.000 formulaciones plásticas diferentes, solo seis polímeros representan el 90% de la producción total de plástico: polipropileno (PP), polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), tereftalato de polietileno (PET), cloruro de polivinilo (PVC), poliestireno (PS) y poliuretano (PU) (Ramkumar, Balasubramani, Santosh, & Nagarajan, 2021). Los polímeros sintéticos más comunes se fabrican a partir de compuestos derivados del petróleo, un recurso no renovable que ha suscitado preocupaciones sobre su sostenibilidad a largo plazo, ya que su modelo de fabricación utiliza recursos decrecientes a precios crecientes (Nagalakshmaiah, y otros, 2019). Además, estos recursos no se están utilizando de manera eficiente. Los plásticos de un solo uso consumen 1.600 millones de litros de petróleo y son eliminados inmediatamente después de su uso, con una posibilidad limitada de reciclaje (Chen, Awasthi, Wei, Tan, & Li, 2021)

La falta de estrategias de gestión de los plásticos una vez que llegan al final de su vida útil, junto con la durabilidad inherente de los materiales poliméricos, ha dado lugar a la inadecuada eliminación de productos plásticos y la acumulación de partículas relacionadas con el plástico. Este problema se ha visto exacerbada por los plásticos de un solo uso y un aumento en la producción de artículos personales provocado por la pandemia de COVID-19 (Mittal, Mittal, & Aggarwal, 2022). El plástico es el tipo de desecho predominante que se encuentra en los reservorios de agua dulce, que representan el 57% en peso del total de desechos. (de Sousa, 2021). De igual manera, los plásticos desechados sometidos a degradación natural se convierten en plásticos microplásticos secundarios, una categoría contaminante emergente de preocupación que a menudo aparece en investigaciones modernas debido a sus efectos potenciales sobre el medio ambiente y la vida silvestre, así como su condición de un vector para partículas contaminantes adjuntas, como metales pesados y disruptores hormonales. (Ali, y otros, 2021)

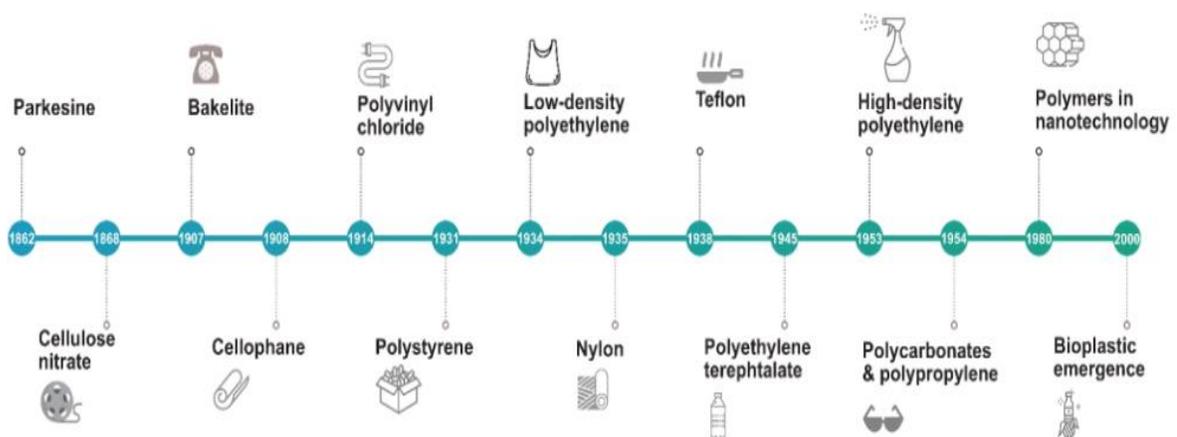
El campo de los plásticos es actualmente, un área de muy frecuente investigación e innovación, en particular en relación con los nuevos productos poliméricos, con un enfoque en su aplicación y actuación. Sin embargo, persisten algunas preocupaciones con respecto a su producción, comercialización y disposición final. La sinergia entre la tecnología, la economía y la industria petroquímica aporta posibles soluciones a estos problemas.

2.2.1. DESARROLLO HISTORICO DE LOS PLASTICOS

Los registros del uso de plásticos datan de hace unos pocos siglos. Las civilizaciones antiguas de todo el mundo utilizaron materiales como resinas, aceites insolubles y ámbar de manera similar a cómo se usa los plásticos hoy en día. La primera referencia a las culturas relacionadas con el caucho nativo de América Central que congeló el látex para crear zapatos impermeables. En 1839, Carlos Goodyear, un inventor estadounidense, descubrió la elasticidad y la resistencia del caucho calentado con azufre (Figura 2.1). Este proceso se denominó vulcanización y se patentó en 1844. Posteriormente, se creó la ebonita y cobró relevancia por ser

termoendurecible y se preparaba a partir de un material natural, el caucho, aunque con mayores cantidades de azufre. En la década de 1850, se optimizaron en Europa las condiciones para el control de la nitración de la celulosa. Se produjo un residuo sólido de la evaporación del solvente, que demostró ser elástico y tener propiedades impermeabilizantes. En 1862, Parkesine fue preparado por la disolución de nitrato de celulosa en disolvente mínimo. En 1863, dos materiales que tenían características similares a parkesine se desarrollaron: xilonita y marfil. En 1869 se fabricaban bolas de billar de tela, polvo de marfil y goma laca en los Estados Unidos. En 1872, el término celuloide se utilizó por primera vez para describir un material obtenido a partir de nitrato de celulosa y alcanfor. El primer miembro en base de proteínas de la familia de polímeros naturales fue desarrollado en Alemania en 1897 a partir de caseína, la cual se hizo reaccionar con formaldehído. La caseína se separó de la leche por coagulación. La caseína formalizada se utilizó en botones, adornos de vestir, collares, juegos de manicura, bolígrafos y otras decoraciones. En 1899, la ebonita fue patentada en el Reino Unido. Fue elaborado por la reacción de resinas fenólicas y aldehídicas y se utilizaba como aislante eléctrico. En 1927, se creó un reemplazo no inflamable para el celuloide, llamado acetato de celulosa, que fue ampliamente utilizado para fibras artificiales. (Gilbert, 2017)

Figura 2.1 Cronología de los plásticos del siglo XIX al XXI



Fuente: Extraído de <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/6/1203/htm>

Entre 1930 y 1940, los principales termoplásticos industriales actuales derivados de etileno se crearon: poliestireno (PS); poli (cloruro de vinilo) (PVC); y poliolefinas, tales como polietileno (PE), polipropileno (PP) y polimetilmetacrilato (PMMA). Durante la Segunda Guerra Mundial (WWII), PMMA, un plástico rígido y transparente, se utilizó para acristalamiento de aviones y, en menor medida, en la fabricación de prótesis dentales. Se sintetizó el primer poliuretano por Otto Bayer en Leverkusen, Alemania, en 1937. La diversidad de materias primas que podrían actuar como fuentes para la producción de poliuretano, así como su amplia gama de usos, habilitaron la amplia aplicación de plásticos en entornos tales como edificios, automóviles, revestimientos y selladores (Das & Mahanwar, 2020)

Se diseñaron más materiales antes de la Segunda Guerra Mundial. Uno era el nailon, un material pegajoso y flexible formulado por primera vez en 1933. Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, la poliamida 66 y el teflón fueron descubiertos en 1941. A mediados de la década de 1950, el polietileno de alta densidad (PE) fue producido, seguido del polipropileno (PP). En 1956 se desarrollaron los policarbonatos en Estados Unidos y Alemania simultáneamente. Una variedad de copolímeros y mezclas fueron producidos durante el período 1960-2000. En la década de 1960, hubo un crecimiento en la variedad de fibras sintéticas. Dos fibras importantes a tener en cuenta fueron Nomex y Kevlar, la primera fibras de meta-aramida y para-aramida creadas por DuPont. Nomex tuvo un mayor punto de temperatura de fusión, mientras que Kevlar tenía una estructura que le permitía crear compuestos, reemplazando las fibras de acero en los neumáticos de carreras y luego usándose para productos de consumo y armaduras humanas. (Jethy, Paul, Das, Adesina, & Mustakim, 2022)

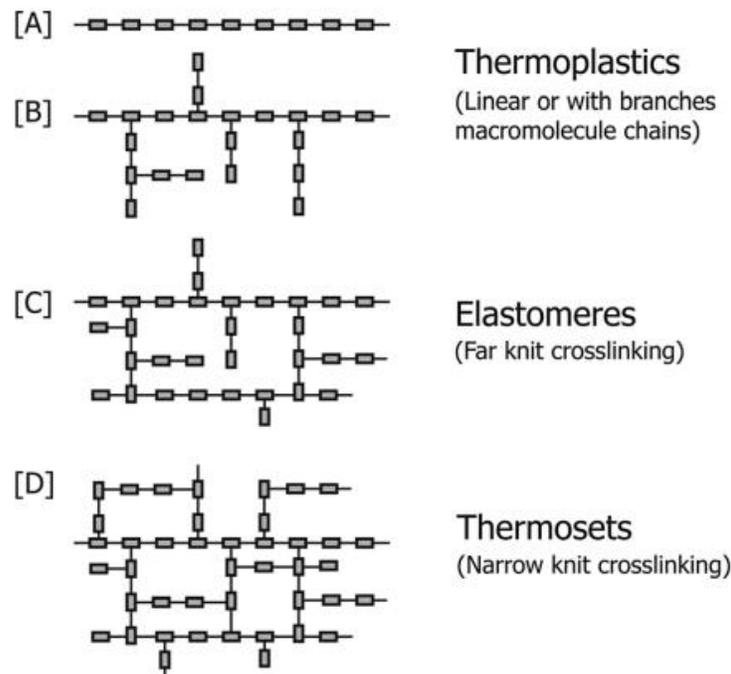
El tereftalato de polibutileno se introdujo en 1969 y, más tarde, el policiclohexilendimetilen tereftalato, que era un poliéster plástico con una temperatura de fusión más alta. Los termoplásticos de alto rendimiento se introdujeron durante las décadas de 1970 y 1980 y podrían soportar temperaturas superiores a 200 °C. En 1977, la polietereftercetona (PEEK) fue inventado, seguido por poliéster sulfona (PES) en 1983. En 1990, el polihidroxibutirato se produjo

comercialmente con el nombre de "Biopol". A fines de la década de 1990, el etileno, el propileno, y el estireno se introdujeron por primera vez. En la década de 2000, el campo de los plásticos se centró en materiales producidos a partir de fuentes vegetales (Kabasci, 2014), área que sigue en constante investigación en la actualidad con el fin de no depender de fuentes fósiles para la elaboración de estos materiales.

2.2.2. TIPOS DE LOS PLÁSTICOS.

Debido a su estructura macromolecular y propiedades físicas dependientes de la temperatura. Los materiales plásticos se distinguen en diferentes clases. La Figura 2.2 da una descripción general de la clasificación de los plásticos. Los termoplásticos están en el rango de aplicación de elasticidad dura o tenaz y pueden ser fundidos por aporte de energía (energía mecánica, térmica o de radiación). Los elastómeros son de elasticidad suave y por lo general no se pueden fundir. Los termoestables están en el rango de aplicación de elasticidad dura y tampoco se pueden fundir.

Figura 2.2 Clasificación de los Plásticos



Fuente: Extraído de https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527409726_c01.pdf

En la Figura 2.2, se observa una estructura principal de macromoléculas lineales (A), con cadenas laterales (B) y reticuladas (C + D). La estructura de cadena (A) y (B) son tipos termoplásticos, estructuras con baja reticulación (C) elastómeros y con fuerte reticulación termoestables (D).

2.2.2.1. TERMOFIJOS O TERMOESTABLES

Los termoestables son duros y tienen una estructura molecular ramificada muy estrecha. El curado tiene lugar durante el conformado, después de lo cual ya no es posible conformar el material por calentamiento. En ese caso, la conformación adicional solo puede realizarse mediante la forma mecanizada. No se pueden moldear repetidas veces. Entre ellos encontramos: resinas fenólicas, amino-resinas, resinas de poliéster, resinas epoxi, poliuretanos, entre otros. (Bellis, 2020)

Figura 2.3 Termoestables



Fuente: Extraído de <https://www.online-sciences.com/industries/thermosets-uses-features-advantages-and-disadvantages/>

2.2.2.2. ELASTÓMEROS.

Si bien los elastómeros también tienen una estructura reticulada, tienen una malla más suelta que los termoestables, lo que da lugar a un grado de elasticidad. Una vez conformados, los elastómeros tampoco pueden remodelarse mediante

calentamiento. Los elastómeros se utilizan, por ejemplo, para producir neumáticos para automóviles, así como diferentes tipos de cauchos. (Bellis, 2020)

Figura 2.4 Elastómeros



Fuente: Extraído de <https://www.hbfuller.com/en/eimea/products-and-technologies/markets-and-applications/elastomers>

2.2.2.3. TERMOPLÁSTICOS.

Los termoplásticos tienen una estructura molecular lineal o ramificada que determina su resistencia y comportamiento térmico; son flexibles a temperaturas ordinarias.

Figura 2.5 Termoplásticos



Fuente: Extraído de <https://sites.google.com/site/pruebasriberadelta/jo/imagenes-de-termoplastico-termoestables-y-elastomeros>

A aproximadamente 120 – 180°C, los termoplásticos se vuelven una masa pastosa/líquida y pueden ser moldeados nuevamente. Entre este tipo de plástico se puede mencionar el polietileno tereftalato (PET), el polietileno de alta densidad (PEAD), el polietileno de baja densidad (PEBD), las poliamidas (PA), el cloruro de polivinilo (PVC), el poliestireno (PS), el poliestireno expandido (EPS), el polipropileno (PP), entre otros. (Bellis, 2020)

Una de las características principales y que al final resulta una gran ventaja es que este tipo de plásticos son reciclables. Es así que la Sociedad de la Industria de Plásticos desarrolló en 1988 el Código de Identificación de Resinas. Donde los productos elaborados tengan un símbolo de aceptación universal que indique el tipo de material tratado.

Figura 2.6 Código de Identificación de Resinas



Fuente: Extraído de <https://gestoresderesiduos.org/noticias/la-clasificacion-de-los-plasticos>

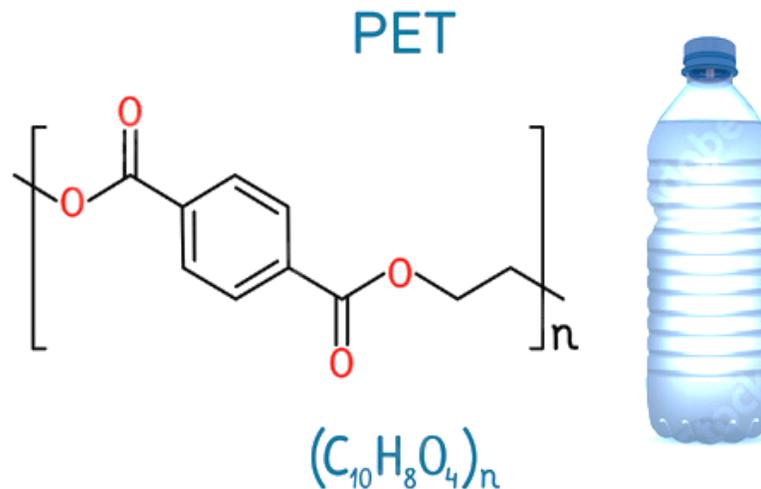
Las flechas que forman el triángulo indican que el producto plástico puede ser reciclado. Los números y letras identifican a cada tipo de plástico. Si el acrónimo lleva una “R” delante, significa que el producto lleva materiales plásticos reciclados. Y entre estas se puede observar a uno de los materiales plásticos que será

estudiado en el presente proyecto de investigación, que es el polietileno de tereftalato más conocido como PET.

2.2.3. POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET)

El PET es una resina plástica popular y un tipo común de poliéster usado comercialmente. La primera síntesis de PET en 1942 por Whinfield y Dickson se llevó a cabo en el Reino Unido al comienzo de la Segunda Guerra Mundial. Desde ese tiempo, el PET tuvo lugar como la producción más masiva de fibra sintética del planeta. Al final de la década de 1970, el proceso de moldeo por estirado fue desarrollado como método para producir botellas de PET cristalinas de larga duración. (Visakh & Liang, 2015)

Figura 2.7 Polietileno de Tereftalato (PET)



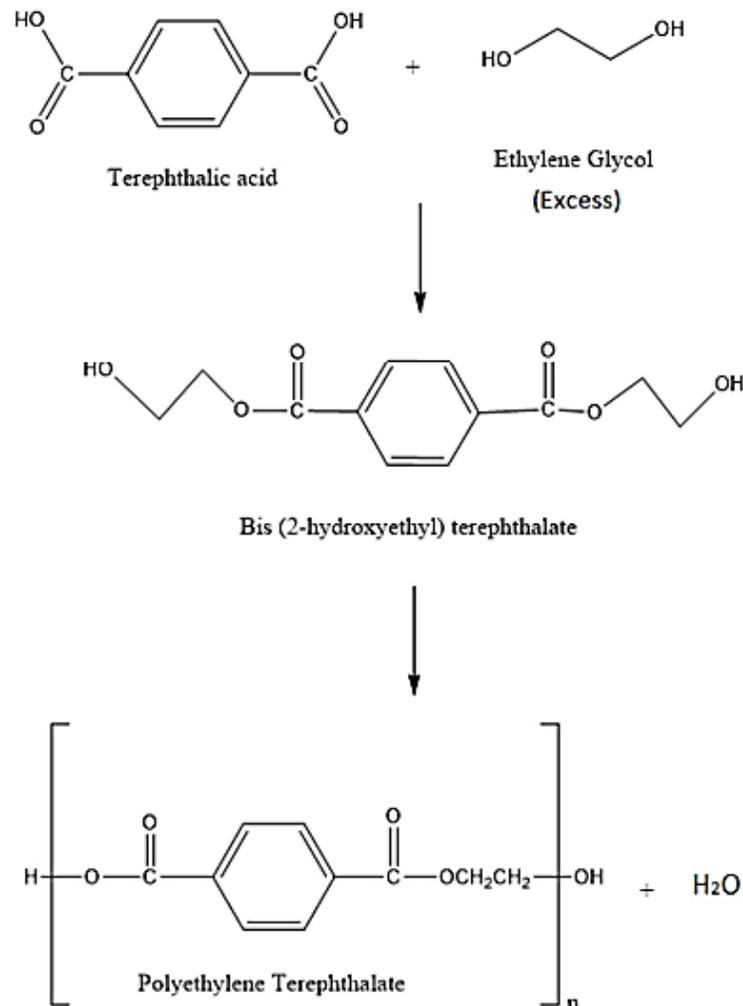
Fuente: Extraído de <https://stock.adobe.com/bo/images/polyethylene-terephthalate-or-pet-pete-polyester-thermoplastic-polymer-molecule-with-plastic-bottle-structural-chemical-formula/279532913>

2.2.3.1. SÍNTESIS DEL PET

El polietileno de tereftalato (PET), se produce por esterificación o reacciones de transesterificación. La reacción de esterificación utiliza etilenglicol y ácido tereftálico como materia prima y se conducen a presiones moderadas entre 2,7 – 5,5 bar y altas temperaturas de 220-260 °C. En el primer paso bis (tereftalato de 2-hidroxietilo)

éster (BHET) se forma en presencia de un exceso de etilenglicol (EG). La unidad repetitiva de este éster da como resultado la formación de tereftalato de polietileno. El agua formada durante esta reacción y el exceso de EG se eliminan continuamente por destilación al vacío (Seymour, 2013). La reacción se muestra en la figura.

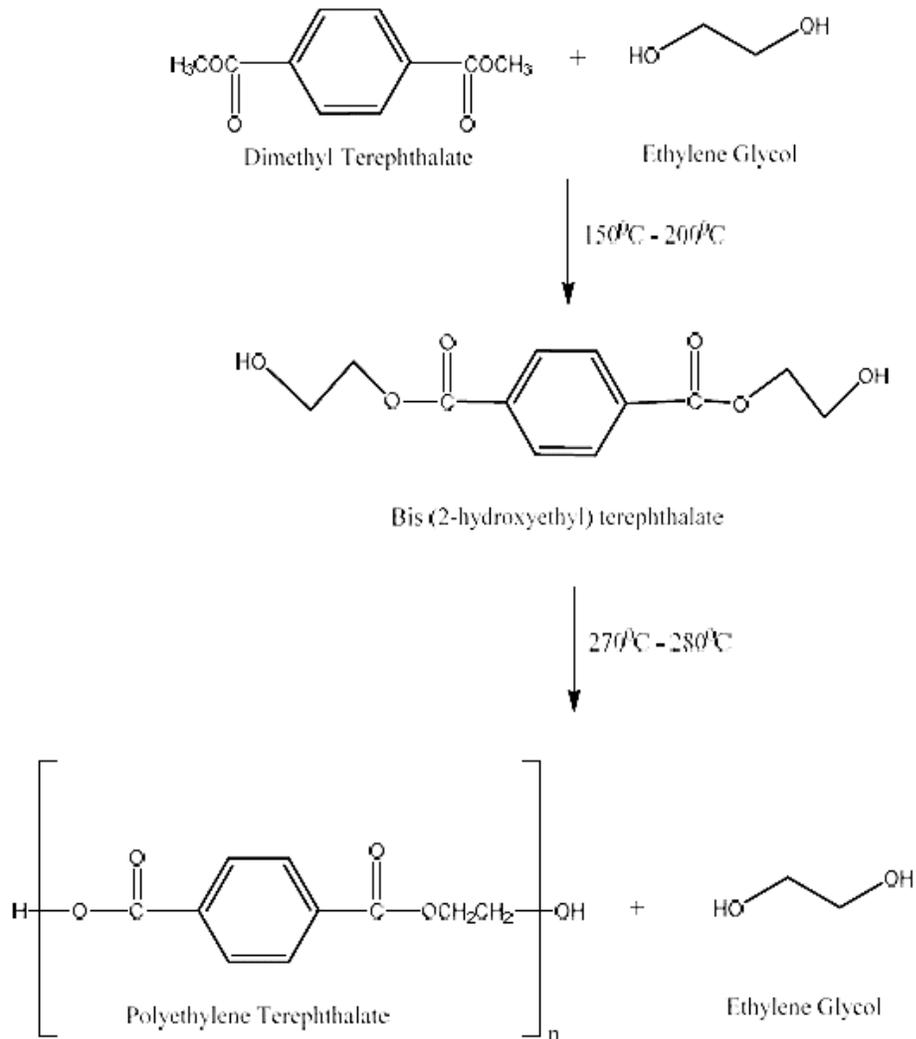
Figura 2.8 Síntesis de PET por vía TPA y EG.



Fuente: *Chemical Recycling of Poly (Ethylene Terephthalate) and its Co-polyesters* (Vinnakota, 2018)

La reacción de transesterificación utiliza tereftalato de dimetilo (DMT) y etilenglicol (EG) en exceso junto con el catalizador básico como materia prima para la producción de PET como se muestra en la Fig. 2-2.

Figura 2.9 Síntesis de PET utilizando la ruta DMT y EG.



Fuente: *Chemical Recycling of Poly (Ethylene Terephthalate) and its Co-polyesters* (Vinnakota, 2018)

El primer paso de la reacción está entre $150 - 200^{\circ}\text{C}$, para impulsar la reacción el metanol se elimina por destilación y el exceso de etilenglicol se elimina por destilación al vacío a una temperatura más alta. El paso de policondensación se lleva a cabo a $270 - 280^{\circ}\text{C}$ con destilación continua de etilenglicol. El monómero bis (2-hidroxietilo) tereftalato es el producto intermedio formado durante la esterificación. Este monómero se condensa para formar el polímero PET con EG como subproducto. (Seymour, 2013)

2.2.3.2. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL PET.

El PET es un polímero termoplástico lineal, con un alto grado de cristalinidad y puede ser procesado mediante: extrusión, inyección, inyección y soplado, soplado de preforma y termoconformado. Éste cuenta con las siguientes propiedades entre muchas otras:

- Cristalinidad y transparencia, aunque admite cargas de colorantes
- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes
- Alta resistencia al desgaste
- Muy buen coeficiente de deslizamiento
- Buena resistencia química
- Buenas propiedades térmicas
- Superficie barnizable.
- Gran indeformabilidad al calor.
- Muy buenas características eléctricas y dieléctricas.
- Alta resistencia a los agentes químicos y estabilidad a la intemperie.
- Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad que lo hacen muy adecuado para la fabricación de fibras.
- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera O₂ y humedad.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Totalmente reciclable
- Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.
- Alta rigidez y dureza.

Algunas de sus propiedades importantes se observan resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Propiedades del PET

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	1,34 – 1.39
Resistencia a la tensión	MPa	59 – 72
Resistencia a la compresión	MPa	76 – 128
Resistencia al impacto, Izod	J/mm	0.01 – 0.04
Dureza	--	Rockwell M94 – M101
Dilatación térmica	10 ⁻⁴ / °C	15.2 – 24
Resistencia al calor	°C	80 – 120
Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 – 15750
Constante dieléctrica (60 Hz)	--	3.65
Absorción de agua (24 h)	%	0.02
Velocidad de combustión	mm/min	Consumo lento
Efecto luz solar	--	Se decolora ligeramente
Calidad de mecanizado	--	Excelente
Calidad óptica	--	Transparente a opaco
Temperatura de fusión	°C	244 - 254

Fuente: Industria del Plástico. Plástico Industrial. Richardson & Lokensgard, 1999.

2.2.4. PROCESOS DE RECICLAJE DE PET.

El plástico puede degradarse en el medio ambiente por cuatro mecanismos: fotodegradación, degradación termo-oxidativa, degradación hidrolítica y biodegradación por microorganismos. La degradación natural del plástico comienza con la fotodegradación debida a la luz ultravioleta del sol que proporciona la energía de activación requerida para iniciar la incorporación de átomos de oxígeno en el polímero, lo que lleva a la degradación termo-oxidativa. En este paso, el plástico se vuelve quebradizo y se fractura en pedazos más pequeños hasta que las cadenas de polímero alcanzan un peso molecular suficientemente bajo para ser metabolizados por microorganismos. Los microorganismos convierten el carbono de las cadenas poliméricas en dióxido de carbono o incorporarlo a biomoléculas, pero este proceso llevará al menos 50 años. (Francis, 2016).

Entonces, una solución a estos problemas será el reciclaje, porque la mayoría de los plásticos comerciales son relativamente estables, lo que dificulta la recuperación de monómeros.

Existen cuatro enfoques distintos para el reciclaje de materiales PET post-consumo:

- I. El reciclaje primario implica el uso y recuperación de residuos industriales pre consumo.
- II. El reciclaje secundario implica el reprocesamiento físico, por ejemplo trituración, fusión y reformado.
- III. El reciclaje terciario implica someter los residuos de PET a tratamiento químico mediante el cual se aíslan sus componentes y reprocesado para su uso en la fabricación.
- IV. Reciclado cuaternario en el que el contenido energético de los residuos plásticos pueden recuperarse mediante incineración.

2.2.4.1. RECICLAJE PRIMARIO

También conocido como reciclaje de ciclo cerrado, es cuando el plástico recuperado se usa en productos que son iguales o similares (en características de rendimiento) al producto original del que proviene. Esto se puede hacer tanto internamente, por ejemplo, material sobrante de un proceso de producción que se reutiliza como materia prima, o externamente, por ejemplo, reciclando botellas de PET recolectadas a través de esquemas de devolución de depósitos de botellas, que se utilizan para producir nuevas botellas.

Es una práctica común en muchas plantas productoras de artículos de plástico, debido a que permite reaprovechar residuos limpios y claramente identificados, disminuyendo así la necesidad de materias primas. Aunque el proceso no es complejo, para poder aplicarlo es importante realizar pruebas que permitan definir la proporción adecuada de reciclados, de tal manera que no se afecten las propiedades y calidad del producto final

El proceso más popular está representado por el reciclaje primario debido a su sencillez y bajo costo. Este proceso se refiere a la reutilización de productos en su estructura original. La desventaja de este proceso está representado por la

existencia de un límite en el número de ciclos para cada material. (Singh, y otros, 2017)

2.2.4.2. RECICLAJE SECUNDARIO

En este proceso, solo se pueden utilizar polímeros termoplásticos, ya que se pueden volver a fundir y reprocesar en productos finales. El reciclado mecánico no implica la alteración del polímero durante el proceso. Este proceso está representado por un método físico, en el que se formarán los residuos plásticos, cortando, triturando o lavando en gránulos, escamas o gránulos de calidad apropiada para fabricación, y luego se funde para hacer el nuevo producto por extrusión. Asimismo, el material reprocesado se puede mezclar con material virgen para obtener resultados superiores. Después de clasificar el plástico, limpiarlo, secarlo y luego procesarlo directamente en productos finales, la cantidad de residuos plásticos reduce drásticamente (Figura 2.10).

Figura 2.10 Pasos que involucran el Reciclaje Mecánico de PET



Fuente: Elaboración Propia en base a información recopilada, 2022

Las desventajas de este método se refieren a la heterogeneidad de los residuos sólidos y el deterioro de las propiedades del producto en cada ciclo que se produce debido al bajo peso molecular de la resina reciclada. Ocurre debido a reacciones de escisión en cadena causadas por la presencia de agua y trazas de impurezas ácidas y para evitar la reducción intensiva del peso molecular. Se recomienda el secado, el uso de compuestos extensores de cadena o el reprocesamiento con desgasificación al vacío. Además, este método es relativamente económico pero requiere una inversión inicial sustancial (Francis, 2016)

2.2.4.3. RECICLAJE TERCIARIO

Este proceso se puede utilizar con el reciclaje mecánico como complemento. El reciclaje químico o reciclaje terciario se define como el proceso en el que los polímeros se convierten químicamente en monómeros o parcialmente despolimerizados a oligómeros a través de una reacción química (se produce un cambio en la estructura química del polímero). Los monómeros resultantes se pueden utilizar para nuevas polimerizaciones para reproducir el producto original o un producto polimérico relacionado. Este método es capaz de transformar el material plástico en pequeñas moléculas, adecuadas para su uso como materia prima a partir de monómeros, oligómeros o mezclas de otros compuestos de hidrocarburos. (Francis, 2016)

Las reacciones químicas utilizadas para la descomposición de polímeros en monómeros son:

- Hidrogenación
- Glicólisis
- Gasificación
- Hidrólisis
- Pirólisis
- Metanólisis
- Despolimerización química
- Craqueo térmico

- Craqueo catalítico y reformado
- Fotodegradación
- Degradación por ultrasonido
- Degradación en reactor de microondas.

El reciclaje químico no está del todo desarrollado y por ello sólo unas pocas empresas lo están trabajando, debido a que este método necesita mucha inversión y personal experto. En este momento, numerosos métodos están bajo investigación; por ejemplo, el método de gasificación y pirólisis están bajo una extensa investigación para establecer las condiciones adecuadas, y los procesos que han alcanzado madurez comercial en este momento son la glicólisis y la metanólisis. (Francis, 2016)

Por ejemplo, el PET (tereftalato de polietileno) puede ser escindido por algunos reactivos, como el agua. (Hidrólisis), ácidos (acidólisis), glicoles (glicólisis) o alcoholes (alcoholólisis). Según el reactivo utilizados, se obtienen diferentes productos. (Singh, y otros, 2017)

2.2.4.4. RECICLAJE CUATERNARIO

Este método se refiere a la recuperación del contenido energético del plástico. La forma más efectiva de reducir el volumen de materia orgánica que implica la recuperación de energía está representado por la incineración. Este método es una buena solución porque genera una cantidad considerable de energía a partir de polímeros, pero no es ecológicamente aceptable debido al riesgo para la salud de las sustancias tóxicas transportadas por el aire, por ejemplo, dioxinas (en el caso de metales pesados, polímeros que contienen cloro, carbonos tóxicos y radicales libres a base de oxígeno).

Entre las técnicas de reciclaje anteriores, la única aceptable según los principios de desarrollo sostenible es el **reciclaje químico**, porque este método conduce a la formación de los monómeros a partir de los cuales se fabrica el polímero.

(Karayannidis & Achilias, 2007). Además, las ventajas y desafíos de las técnicas se presentan en la Tabla 2.3

Tabla 2.2 Ventajas y desafíos de las técnicas de reciclaje de PET

Técnica	Ventajas	Desafíos
Reciclaje Mecánico	Rentable, eficiencia bien conocida	Deterioro del producto propiedades, pretratamiento
Reciclaje Químico	Operacional para PET, tecnología sencilla	Limitado principalmente a polímeros de condensación
Reciclaje Energético	Genera considerable energía de polímeros	No ecológicamente aceptable

Fuente: Elaboración Propia en base a información recopilada, 2022

2.2.5. IMPORTANCIA DEL RECICLAJE QUÍMICO

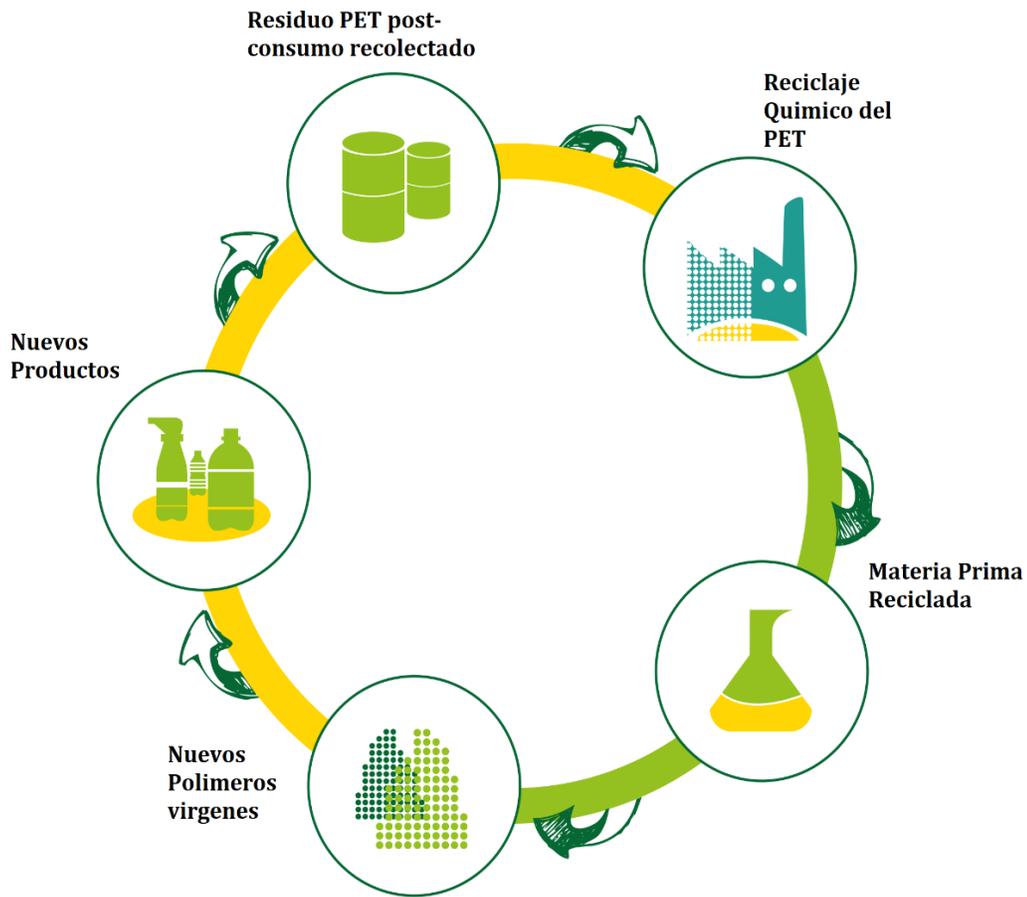
La principal ventaja del reciclaje químico es que puede tratar residuos que no se pueden reciclar mecánicamente, por lo tanto, juega un papel importante en la combinación de soluciones para abordar el problema de los desechos plásticos, los cuales en su mayoría se queman en un incinerador, terminan en un vertedero o ensucian las calles y vías fluviales de varias ciudades. El reciclaje químico es la única tecnología disponible en la actualidad que puede cambiar esto.

Dado que la aplicación de esta tecnología para tratar residuos plásticos es relativamente nueva y todavía se está desarrollando rápidamente, es comprensible que plantee preguntas legítimas sobre su huella de carbono y viabilidad comercial. Esta es la razón por la cual la industria petroquímica ahora está realizando una serie de evaluaciones del ciclo de vida que analizan más de cerca el impacto ambiental, y se ha comprometido a mejorar aún más esta tecnología a través de sus esfuerzos de investigación y desarrollo. (Ali, y otros, 2021)

El reciclaje químico se lleva a cabo ya sea por (i) solvólisis o por (ii) pirólisis, donde la solvólisis implica la degradación por disolventes, incluida el agua, y la pirólisis implica la degradación por calor en ausencia de oxígeno o aire, o vacío. El reciclaje químico produce monómeros, líquidos de petróleo y gases, donde los monómeros

se purifican por destilación y secado, y utilizado para la fabricación de polímeros (Sinha & Patel, 2010).

Figura 2.11 Circularidad del reciclaje químico del PET



Fuente: Elaboración Propia en base a información recopilada, 2022

En el presente trabajo de investigación, se estudiará y se aplicará el reciclaje químico por el método de solvólisis, es por ello que a continuación se procede a revisar los principios y conceptos que involucran a esta forma de reciclaje.

2.2.6. SOLVÓLISIS

La solvólisis implica la ruptura de enlaces C-O o C-N, en polímeros de alto volumen e involucra agua o alcohol como uno de los reactivos. El proceso de solvólisis se divide de la siguiente manera: (1) Hidrólisis, (2) Aminólisis, (3) Amonólisis (4) Metanólisis y (5) glicólisis.

2.2.6.1. HIDRÓLISIS

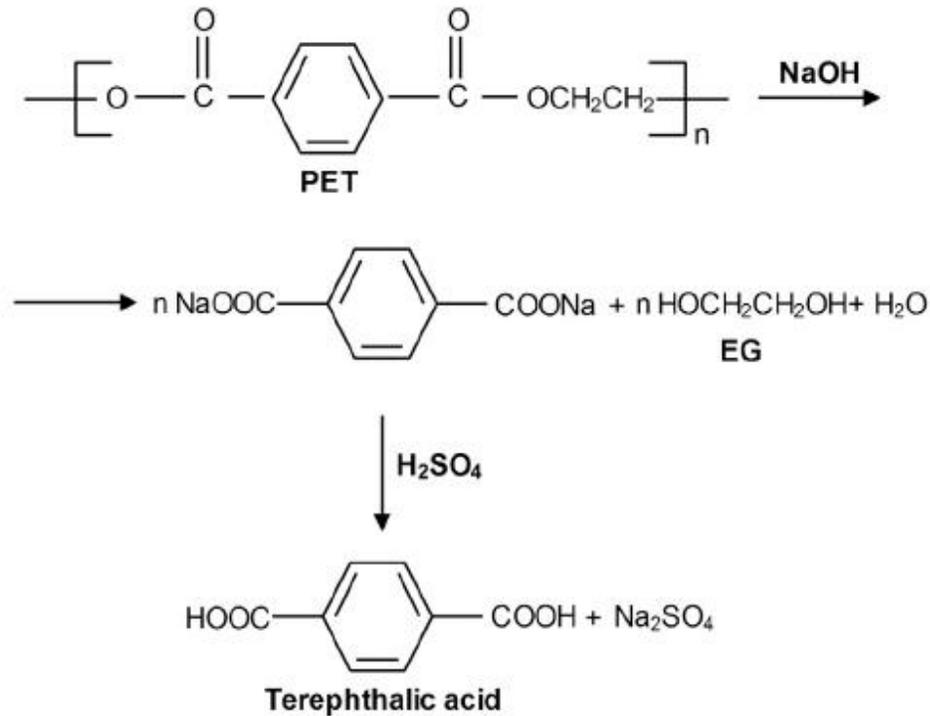
Se trata de la hidrólisis de PET post-consumo, a TPA y EG. Un interés creciente en este método está conectado con el desarrollo de la síntesis de PET directamente de EG y TPA, que elimina el metanol del ciclo tecnológico. La principal desventaja de este método es el uso de alta temperatura (200–250 C) y presión (1.4 – 2 MPa), así como mucho tiempo necesario para la despolimerización completa.

Comercialmente, la hidrólisis no se usa mucho para producir PET reciclado de calidad alimentaria, debido al costo asociado con purificación del TPA reciclado. La hidrólisis del PET puede subdividirse en (1) hidrólisis alcalina, (2) hidrólisis ácida y (3) hidrólisis neutra. (Sinha & Patel, 2010)

- **HIDRÓLISIS ALCALINA**

La hidrólisis alcalina del PET (Figura 2.12) se suele realizar con el uso de una solución alcalina acuosa de NaOH, o KOH de una concentración de 4-20% en peso. Pitat et al. han patentado un método de hidrólisis alcalina de PET en un 18% en peso solución de NaOH. Los resultados más ventajosos que se lograron fueron a una relación en peso de PET:NaOH de 1:20, a aproximadamente 100 C en 2 h. Lázaro et al. describió un proceso que permite la recuperación de TPA y otros componentes monoméricos de mezclas poliméricas PET/poliamida 6. Namboori y Haith compararon la reactividad de soluciones acuosas de NaOH, como así como soluciones de terc-butóxido de sodio en terc-butanol, isopropóxido de sodio en alcohol isopropílico, metóxido de sodio en metanol y etóxido de sodio en etanol con PET. Han demostrado que el etóxido de sodio en etanol es el más reactivo y una solución acuosa de hidróxido de sodio es el menos reactivo. Oku et al. informó la adición de un éter (como dioxano o tetrahidrofurano) como disolvente mixto con un alcohol (metanol o etanol) aceleró la reacción. El tiempo para la reacción completa (> 96%) de sólido PET con NaOH en metanol a 60 C fue 40 min con dioxano como codisolvente y 7 h sin dioxano. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2015)

Figura 2.12 Hidrólisis alcalina de PET usando NaOH o KOH



Fuente: Extraído de https://www.researchgate.net/figure/Alkaline-hydrolysis-of-PET-using-NaOH-or-KOH-as-described-in-29_fig1_275773280

La hidrólisis de PET en una solución alcalina no acuosa implica la hidrólisis del PET post-consumo mediante hidrólisis alcalina en solución no acuosa de etilenglicol. Benzaria et al. describió un proceso interesante, en el que la despolimerización se llevó a cabo en una mezcladora-extrusora con el uso de sólidos hidróxido de sodio a temperaturas de 100–200 C. Collins y Zeronian han demostrado que las soluciones de NaOH en metanol reaccionan con PET significativamente más rápido que en soluciones acuosas.

Se ha informado que un catalizador de transferencia de fase cataliza la hidrólisis alcalina de PET. El catalizador de transferencia de fase (PTC) sufre una reacción de intercambio iónico con la sal inorgánica en la fase acuosa y forma un par iónico, que puede cruzar la interfase sólido-líquido debido a su naturaleza lipofílica. En la fase orgánica, este par de iones sufre una reacción de desplazamiento nucleofílico

con el reactivo orgánico para formar el producto. El nuevo par de iones regresa a la fase acuosa y el ciclo continúa. Sin embargo, cuando las bases inorgánicas fuertes están presentes, el proceso no es tan claro. El uso de PTC ha sido propuesto para la hidrólisis alcalina del PET, con el fin de llevar a cabo la reacción en condiciones experimentales suaves, es decir, presión atmosférica y temperaturas por debajo de 100 C. El método se ha aplicado en fibras de PET, así como Nylon 46 y fibras de nailon 66. Se obtuvieron muy buenos resultados para la despolimerización de PET y el rendimiento en ácido tereftálico fue tan alto como 93%. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & EIMetwally, 2015)

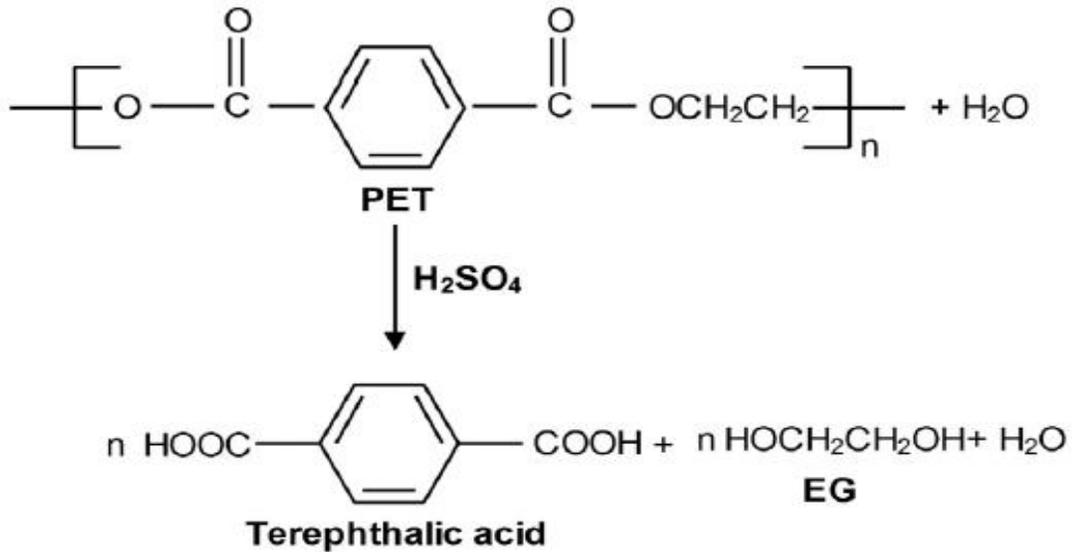
- **HIDRÓLISIS ÁCIDA**

La hidrólisis ácida se realiza con mayor frecuencia usando ácido sulfúrico concentrado como se muestra en la Figura 2.12, aunque otros minerales ácidos como el ácido nítrico o fosfórico también han sido empleados. Para evitar altas presiones y temperaturas en el recipiente de reacción, el uso de ácido sulfúrico concentrado (14,5 M) ha sido propuesto por Pusztaszeri, Brown, O'Brien y Sharma. Sin embargo, el proceso se vuelve muy costoso debido a la necesidad de reciclar grandes cantidades de H_2SO_4 concentrado y la purificación de EG a partir del ácido sulfúrico. La recuperación de TPA a partir de material de desecho de PET en ácido sulfúrico concentrado a 60–93 C, también se ha descrito. En otro patente, la producción de TPA puro fue descrita por hidrólisis ácida de PET en una solución de H_2SO_4 al 90% en peso a 85–90 C.

Un inconveniente sustancial de la hidrólisis de PET por ácido sulfúrico concentrado es la alta corrosividad del sistema de reacción y la generación de grandes cantidades de sales inorgánicas y desechos acuosos. Yoshioka et al. también describió un proceso para la despolimerización de polvo de botellas PET de desecho, utilizando ácido nítrico (7–13 M) a 70–100 C durante 72 h. TPA y EG fueron producidos y el EG resultante fue simultáneamente oxidado a ácido oxálico. El método propuesto tenía la ventaja de dar lugar a productos de valor añadido

como el ácido oxálico, que es más caro que TPA y EG. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2015)

Figura 2.13 Despolimerización de PET usando H_2SO_4



Fuente: Extraído de https://www.researchgate.net/figure/Depolymerization-of-PET-using-H-2-SO-4-as-described-in-40_fig9_275773280

- **HIDRÓLISIS NEUTRA**

La hidrólisis neutra se lleva a cabo con el uso de agua o vapor. A pesar de esto, el pH de la mezcla de post reacción asciende a 3,5–4,0, que según Michalski es causada por la formación de éster de monoglicol TPA durante la reacción. El proceso suele funcionar a una presión de 1 a 4 MPa a temperaturas de 200–300 C. La relación en peso de PET a agua es de 1:2 a 1:12.

Se ha confirmado que la hidrólisis del PET avanza significativamente más rápido en estado fundido que en estado sólido; por tanto, es ventajoso llevar a cabo el reciclaje utilizando este método a temperaturas superiores a 245 C.

Una ventaja indudable de la hidrólisis neutra es su alta pureza ecológica, y por lo tanto se puede esperar un creciente interés en esta tecnología. Su inconveniente es que todas las impurezas mecánicas presentes en el polímero quedan en el TPA;

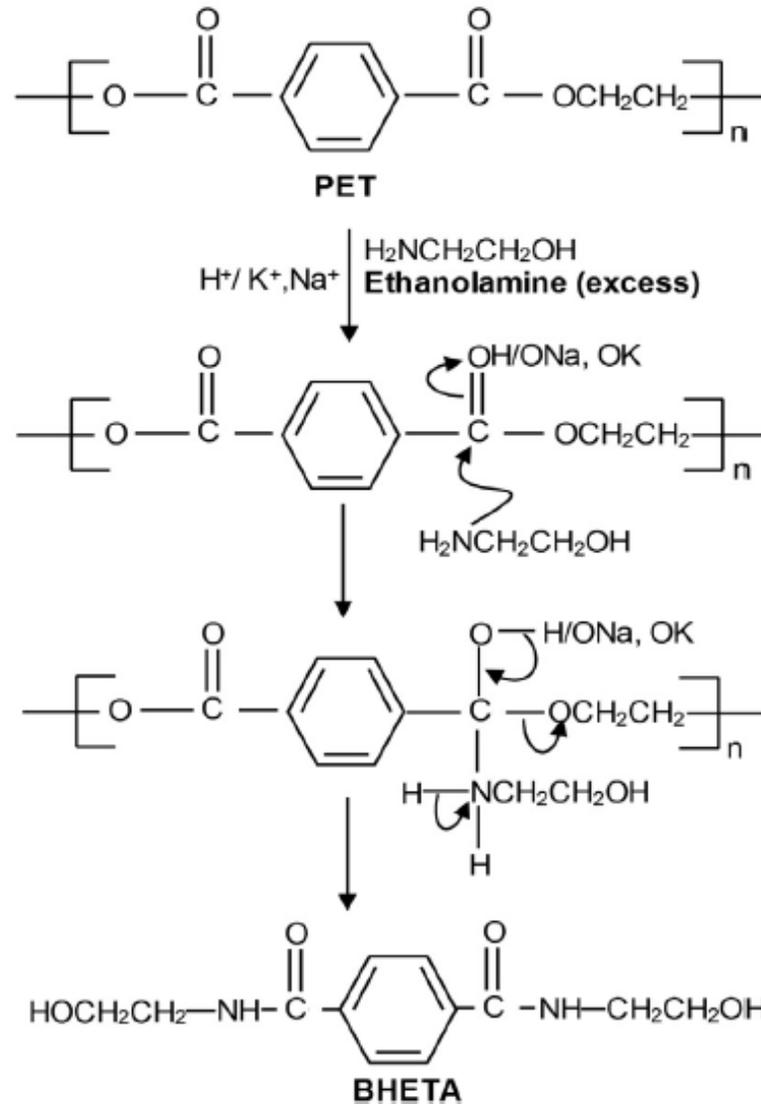
por lo tanto, el producto tiene una pureza considerablemente peor que el producto de hidrólisis ácida o alcalina. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2015)

2.2.6.2. AMINOLISIS.

La aminólisis del PET produce diamidas de TPA, que se conoce como bis (2-hidroxietileno) tereftalamida (BHETA) como se muestra en la Figura 2.14. No hay informes conocidos sobre la utilización de este proceso a escala comercial en el reciclaje de PET. De todos modos, se sabe que la aminólisis parcial ha encontrado su aplicación en la mejora de las propiedades del PET en la fabricación de fibras con propiedades de procesamiento definidas. En la mayoría de los procesos de aminólisis PET descritos, el polímero estaba en forma de polvo o fibras. La reacción se llevó a cabo normalmente usando soluciones acuosas de aminas primarias, más frecuentemente metilamina, etilamina y etanolamina a la temperatura rango de 20-100 C. La n-butilamina anhidra también fue aplicada como agente aminolítico a una temperatura de 21 C.

Shukla y Harad han usado etanolamina para la aminólisis de materiales de PET post-consumo en la relación molar 1:6 (PET:etanolamina) a reflujo en presencia de diferentes catalizadores por períodos de tiempo que varían hasta 8 h. Los catalizadores, a saber, ácido acético glacial, acetato de sodio y sulfato de potasio, se utilizaron en concentraciones que oscilan entre 0,3% y 1,5% en peso de polímero. Zahn y Pfeifer realizaron la aminólisis de PET con soluciones de hidracina, bencilamina, etilendiamina, hexametilendiamina, piperidina y anilina. Se obtuvieron diferentes productos de reacción como las diamidas del ácido tereftálico, que no poseen ningún potencial para otras reacciones químicas. Tawfik y Eskander investigaron la degradación de aminólisis de los residuos de PET por etanolamina (EA) en presencia de óxido de dibutilestaño (DBTO) como un catalizador. Spychaj et al. Describió la degradación química de residuos de PET con poliaminas, como la dietilentriamina, trietilentetramina y sus mezclas, así como mezclas de trietilentetramina y p-fenilendiamina o trietanolamina, y las características de los productos. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2015)

Figura 2.14 Aminólisis de PET



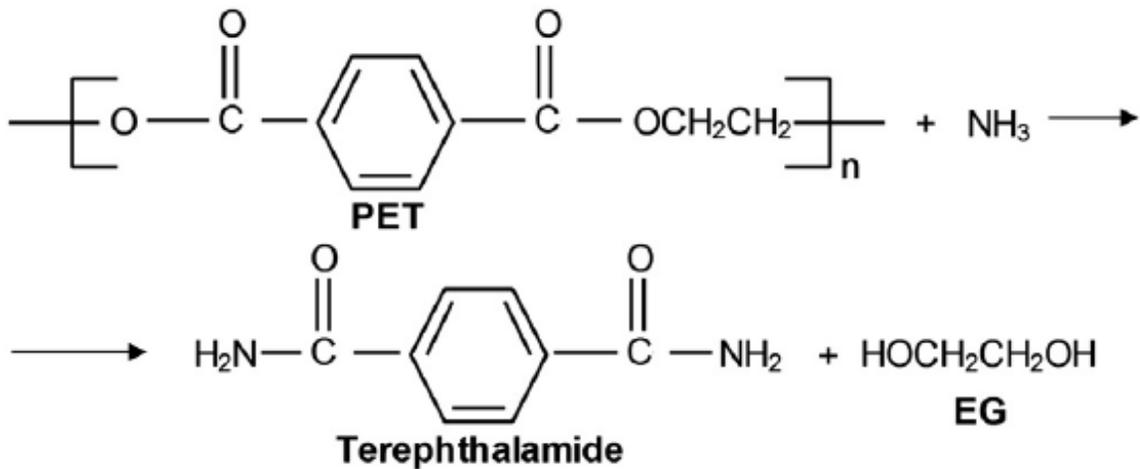
Fuente: Extraído de https://www.researchgate.net/figure/Aminolysis-of-PET-as-described-in-50_fig2_275773280

2.2.6.3. AMONÓLISIS.

La tereftalamida es producida por la acción del amoníaco sobre PET en un ambiente de etilenglicol como se muestra en la Figura. 2.15. Se obtuvieron muy buenos resultados de la amonólisis de residuos de PET de botellas post-consumo. El proceso se llevó a cabo bajo una presión de aproximadamente 2 MPa en un rango de temperatura de 120 a 180 C durante 1 a 7 h. Después de que la reacción se

completó, la amida producida se filtra, se enjuaga con agua y se seca a una temperatura de 80 C. el producto tiene una pureza de no menos del 99%, y el rendimiento es superior al 90%.

Figura 2.15 Amonólisis de PET



Fuente: Extraído de https://www.researchgate.net/figure/Ammonolysis-of-PET-as-described-in-55_fig5_275773280

Un método de baja presión de amonólisis PET, en el que el agente de degradación es el amoníaco en un ambiente de etilenglicol, también es conocido. El proceso es catalizado por acetato de zinc, en una cantidad de 0,05% en peso, conducido a una temperatura de 70 C y se produjo una relación de PET-NH₃ de 1:6 de tereftalamida con un rendimiento de alrededor del 87%. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2015)

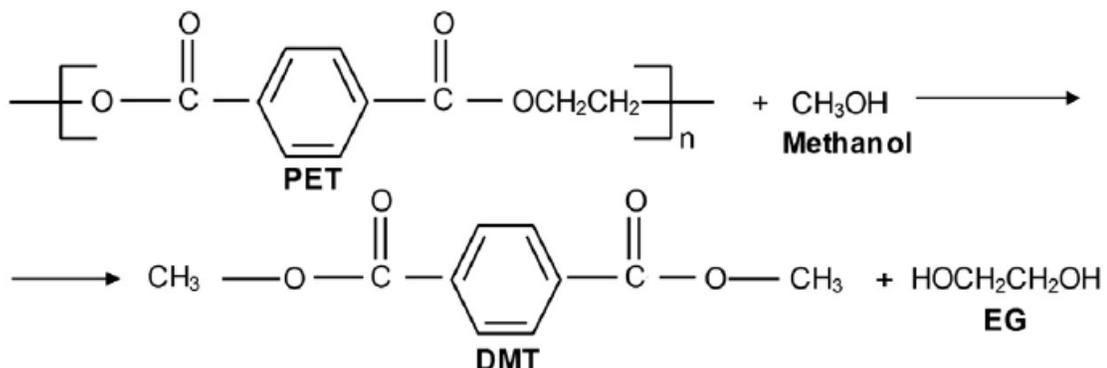
2.2.6.4. METANÓLISIS

La metanólisis en realidad implica la degradación del PET por metanol a altas temperaturas y altas presiones, siendo los principales productos tereftalato de dimetilo (DMT) y etilenglicol (EG) como se muestra en la Figura 2.15. La metanólisis de las escamas de PET generalmente se realiza a temperaturas entre 180 C y 280 C y presiones de 2 a 4 MPa. La metanólisis se aplica actualmente y con éxito para botellas post-consumo, desechos de fibra, películas usadas y desechos de plantas.

La alcoholólisis de PET con trimetilol propano en presencia de acetato de zinc como catalizador se informó para dar productos que, al mezclarse con PVC, podría dar lugar a plastisoles de PVC. Hay ejemplos conocidos del uso de sales ácidas arilsulfónicas como catalizador para la degradación metanólica del PET. Los elementos principales de la instalación utilizados en la metanólisis son el autoclave, cristalizador, centrífugador, y un sistema para la fusión y destilación del DMT obtenido. Gruschke et al. informó que el PET fue completamente (más del 99%) despolimerizado a DMT y EG al hacer reaccionar PET fundido con metanol a 210 C en la ausencia de un catalizador. Sako et al. propuso un nuevo proceso de metanólisis mediante el tratamiento de PET con metanol supercrítico. En este proceso, el PET se puede despolimerizar completamente para DMT, EG y oligómeros por encima de 300 C a 11 MPa para 30 min sin catalizador.

La principal ventaja de este método es que una instalación de la metanólisis se puede ubicar en la línea de producción de polímeros, ya que el DMT producido tiene una calidad de producto idéntica a la virgen DMT. Además, el etilenglicol y el metanol se pueden fácilmente recuperable y reciclado. De esta forma, los residuos de PET derivados en el ciclo de producción se utiliza y los monómeros se recuperan se puede reutilizar en la fabricación de un polímero de valor completo.

Figura 2.16 Metanólisis de PET



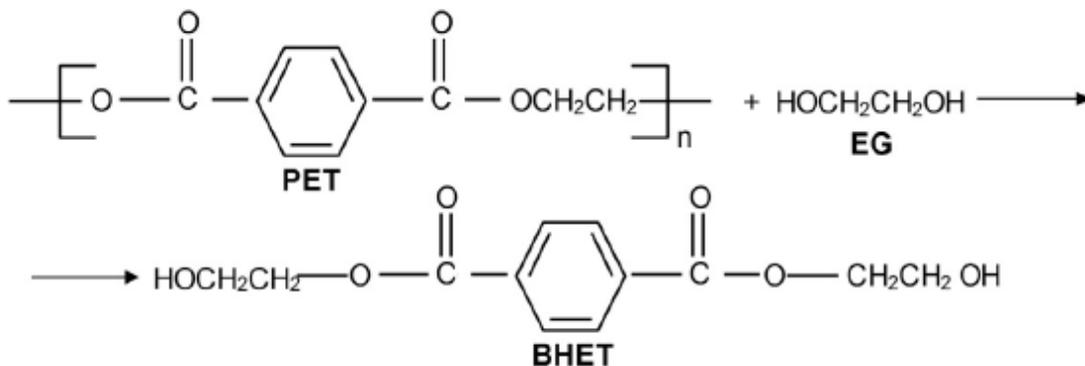
Fuente: Extraído de https://www.researchgate.net/figure/Methanolysis-of-PET-as-described-in-28_fig6_275773280

Las desventajas del método incluyen el alto costo asociado con la separación y refinado de la mezcla de los productos de reacción (glicoles, alcoholes y derivados de ftalatos). Si el agua perturba el proceso, envenena el catalizador y forma varios azeótropos. Sin embargo, la principal desventaja está asociada con la tendencia de todos los nuevos procesos de producción de PET utilizar TPA en lugar de DMT como materia prima. La conversión de la DMT producida por hidrólisis a TPA agrega considerable coste para el proceso de metanólisis. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2015)

2.2.6.5. GLICÓLISIS

La reacción de la glicólisis es la reacción molecular de degradación del polímero PET por glicoles, en presencia de catalizadores de transesterificación, donde se rompen los enlaces éster y se los reemplaza con terminales de hidroxilo como se muestra en Figura 2.16.

Figura 2.17 Glicólisis de PET



Fuente: Extraído de https://www.researchgate.net/figure/Glycolysis-of-PET-as-described-in-7_fig7_275773280

La glicólisis de PET se describió por primera vez en una patente en 1965. A fines de la década de 1980, varias patentes adicionales de glicólisis PET fueron emitidas. Las variables que afectan la tasa de glicólisis de PET se han estudiado en detalle. La degradación de PET se lleva a cabo con mayor frecuencia usando etilenglicol,

dietilenglicol, propilenglicol y dipropilenglicol. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2015)

Los estudios sobre la cinética de la glicólisis PET han demostrado que la glicólisis sin catalizador es una despolimerización muy lenta y no se puede lograr una transformación completa de PET a BHET. También rinde un producto final que contiene una cantidad significativa de otros oligómeros, además del monómero BHET. Esto resulta en una gran dificultad en la recuperación del monómero BHET cuando es el producto deseado. Por lo tanto, los esfuerzos de investigación se han dirigido hacia el aumento de la tasa y el rendimiento de monómero BHET mediante el desarrollo de catalizadores altamente eficientes y otras técnicas, y así optimizar las condiciones de reacción (por ejemplo, temperatura, tiempo, relación PET/EG, relación PET/catalizador).

2.2.7. PRODUCTOS OBTENIDOS POR SOLVÓLISIS DEL PET

En base a lo que se ha indicado anteriormente, se identifica al reciclaje químico como aquel que posibilita la obtención de compuestos que han sido la materia prima de origen para la obtención de resina PET virgen.

Figura 2.18 Productos de diferentes formas de solvolisis de PET



Fuente: Extraído de <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/17/4782/htm>

Mediante la solvólisis se ha visto que se puede obtener diversos compuestos, por ejemplo, mediante la metanolisis se puede obtener dimetiltereftalato (DMT) y etilenglicol (EG), mediante la glicólisis se puede obtener tereftalato de bis (2-hidroxietileno) (BHET) y etilenglicol (EG), mediante la aminolisis y la amonolisis se

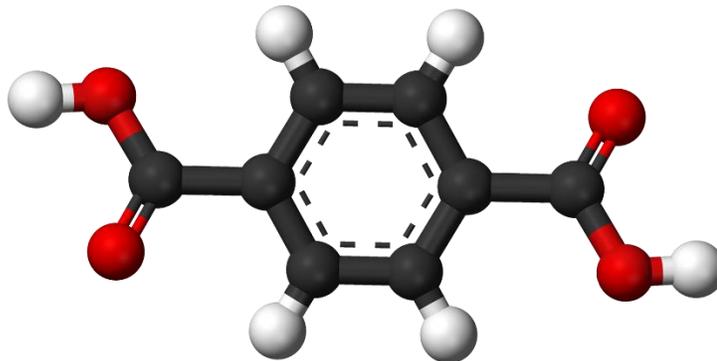
puede obtener amidas y otros compuestos además de etilenglicol (EG) y finalmente de la hidrólisis se puede obtener ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG).

Como se observa en la figura anterior, de todas las formas de solvolisis, la hidrólisis es la única que podría generar como producto de manera directa al ácido tereftálico (TPA). Es por ello que en el presente trabajo de investigación, el cual tiene como principal objetivo obtener ácido tereftálico (TPA), se estudia en específico al método de ***solvolisis por hidrólisis*** ya que es el único que nos permite obtener de manera directa este compuesto.

2.2.8. ACIDO TEREFTALICO (TPA)

El ácido tereftálico es un compuesto orgánico de fórmula $C_6H_4(COOH)_2$. Este sólido blanco es un producto químico básico, utilizado principalmente como precursor del poliéster PET, utilizado para fabricar ropa y botellas de plástico. Anualmente se producen varios millones de toneladas. El nombre común se deriva del árbol productor de trementina Pistacia terebinthus y ácido ftálico. (Sheehan, 1985)

Figura 2.19 Estructura molecular ácido Tereftálico.



Fuente: Extraído de https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_tereft%C3%A1lico

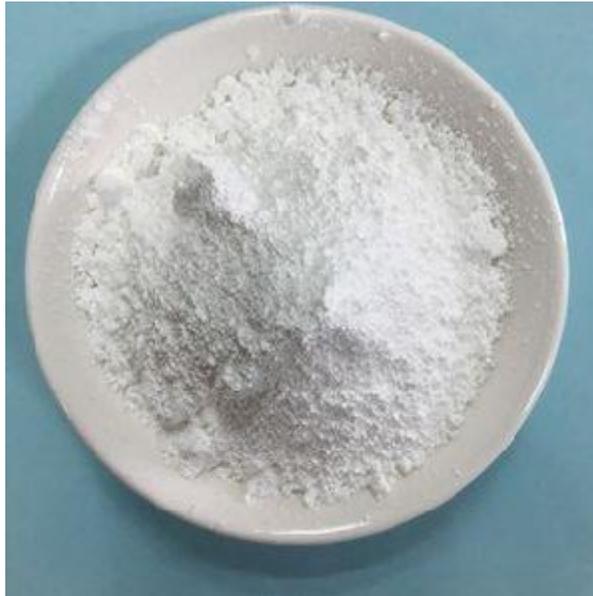
La producción en masa del ácido tereftálico no fue posible hasta después de la 2da Guerra Mundial, en Inglaterra por Imperial Chemical Industries (ICI) en 1949 y en los Estados Unidos por Du Pont en 1953. Ambas compañías emplearon p-xileno que era convertido en ácido tereftálico por un proceso de oxidación con ácido nítrico

diluido, que consiste en la oxidación del p-xileno en presencia de un catalizador y un solvente (Diosado, Marín, & Rodríguez, 2021).

2.2.8.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACIDO TEREFTALICO

El ácido tereftálico comúnmente se presenta en forma de cristales o polvo de color blanquecino, es prácticamente insoluble en agua, cloroformo, éter, ácido acético; es ligeramente soluble en etanol caliente y piridina, cuenta con una densidad de 1.510 g/l a 25°C y tiene un punto de fusión de 427°C. Su punto de sublimación normal es de aproximadamente 300°C.

Figura 2.20 Aspecto físico de Ácido Tereftálico



Fuente: Extraído de https://es.made-in-china.com/co_hbexncn/product_Chemical-Materials-Terephthalic-Acid-CAS-100-21-0-1333-86-4_uogiyhnggg.html

Es importante destacar que las propiedades físicas dificultan por mucho a la obtención de ácido tereftálico puro con el fin de realizar una policondensación directa de este ácido para la obtención de PET. En resumen, el ácido Tereftálico puro es difícil de obtener, debido a que no se puede recrystalizar con facilidad, es infusible y solo por encima de 300°C es sublimable (Diosado, Marín, & Rodríguez, 2021). A continuación, se describe la solubilidad en diferentes sustancias y la relación de la presión de vapor y la temperatura en diferentes condiciones.

Tabla 2.3 Solubilidad del ácido tereftálico en solventes

Solubilidad del Ácido Tereftálico g/100g solvente					
SOLVENTE	25 C	120 C	160 C	200 C	240 C
Metanol	0.1	-	2.9	15	-
Agua	0.0019	0.08	0.38	1.7	9
Ácido Acético	0.035	0.3	0.75	1.8	4.5

Fuente: Datos recabados del postulado Ingeniería básica de una planta de producción de Polietileno Tereftalato, 2017.

2.2.8.2. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ACIDO TEREFTALICO

El ácido tereftálico tiene 2 grupos carboxilo en la posición “para”, en lugar de la posición “orto”, consecuentemente el ácido es estable; y es manufacturado y vendido como tal. Éste exhibe las reacciones características de los ácidos dicarboxílicos y ésteres, lo cual implica que dona el ion hidrogeno sí se encuentra en presencia de una base. Esta reacción de neutralización es exotérmica produciendo agua más sal tereftalato. Su baja solubilidad no impide la absorción de pequeñas cantidades de agua del aire, las cuales disuelven el ácido, generando problemas de corrosión sobre hierro, acero e inclusive aluminio. Su baja solubilidad y alto punto de fusión hace que sus reacciones sean más difíciles de llevarse a cabo que las reacciones de los otros ácidos. Reacciona con alcoholes simples en presencia de un catalizador ácido fuerte a temperaturas bajas y templadas o sin un catalizador a altas temperaturas. El ácido tereftálico puede reaccionar con glicoles para formar polímeros y usarse en la fabricación de fibras y películas. Las sales de amonio, sodio y potasio son solubles en agua, estos tipos de sales proveen un medio conveniente para la purificación del ácido para su uso en poliésteres (De la Oliva, 2017).

Algunas otras reacciones de importancia ambiental y sanitaria producidas del ácido tereftálico, son las reacciones con soluciones de cianuro, produciendo cianuro de hidrogeno. También reacciona con compuestos diazo, ditiocarbamatos, isocianatos, mercaptanos, sulfuros y nitruros, generando calor y gases inflamables y/o tóxicos.

La reacción con sulfato, nitrato y tiosulfatos produce H_2S y SO_3 , con ditionito produciendo (SO_2), gases que son inflamables y/o tóxicos, todas las reacciones mencionadas son exotérmicas (Cirio & Salas, 2016). Puede ser oxidado y reducido con agentes altamente oxidantes o reductores, estas reacciones transfieren calor. Puede iniciar las reacciones de polimerización y usarse como catalizador en otras reacciones (Granja Pérez, 2018).

2.2.8.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACIDO TEREFTALICO

A nivel técnico las especificaciones del ácido tereftálico se han limitado a un mínimo contenido de ácido del 98,5% en peso, un máximo contenido de humedad del 0,5% en peso, y un mínimo número ácido de 670,0 mg KOH/g, los ya mencionados son aplicados como valores promedios. A diferencia, el ácido tereftálico grado polímero (PTA) debe ajustarse a muchas especificaciones, debido a que se emplea para producir fibras poliéster, película y resina. No obstante, los estándares industriales no han sido establecidos oficialmente, el ácido tereftálico grado polímero producido por el proceso Amoco Chemical Corporation y Mobil Chemical Company cumplen con las especificaciones que se muestran en la siguiente tabla (Hernández, 2012).

Tabla 2.4 Especificaciones técnicas del ácido tereftálico grado polímero

PROPIEDADES	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS
Número ácido, mg KOH/g	6752	Titulación
Ceniza, ppm	15 máx.	Pirolisis
Total, de metales significativos (Mo, Cr, Co, Ni, Fe, Ti, Mg), ppm	10 máx.	Absorción atómica
4-CPA, ppm	25 máx.	Polarografía
Humedad, % en peso	0,5 máx.	Karl Fischer
5% dimetilformamida sol. Color APHA	10 máx.	Colorímetro

Fuente: Análisis y solución de los defectos de la preforma PET, Hernández, 2012.

2.2.8.4. APLICACIONES DEL ACIDO TEREFTALICO

Prácticamente todo el suministro mundial de ácido tereftálico (TPA) y tereftalato de dimetilo (DMT) se consume como precursores del tereftalato de polietileno (PET). La producción mundial en 1970 fue de alrededor de 1,75 millones de toneladas. En 2006, la demanda mundial de ácido tereftálico purificado (PTA) había superado los 30 millones de toneladas. Existe una demanda menor, pero significativa, de ácido tereftálico en la producción de tereftalato de polibutileno y varios otros polímeros de ingeniería. (Ashford's Dictionary of Industrial Chemicals, 2011)

Figura 2.21 Aplicaciones comunes del ácido tereftálico purificado



Fuente: Extraído de <https://mitsubishichemical.co.id/product/our-product/pta>

- Las fibras de poliéster basadas en PTA brindan un fácil cuidado de las telas, tanto solas como en mezclas con fibras naturales y otras fibras sintéticas. Las películas de poliéster se usan ampliamente en cintas de grabación de audio y video, cintas de almacenamiento de datos, películas fotográficas, etiquetas y otros materiales laminares que requieren tanto estabilidad dimensional como dureza.
- El ácido tereftálico se utiliza como materia prima para fabricar plastificantes de tereftalato como el tereftalato de dioctilo y el tereftalato de dibutilo.
- Se utiliza en la industria farmacéutica como materia prima para ciertos medicamentos.
- Además de estos usos finales, los poliésteres y poliamidas a base de ácido tereftálico también se utilizan en adhesivos de fusión en caliente.
- El PTA es una materia prima importante para poliésteres saturados de bajo peso molecular para recubrimientos en polvo y solubles en agua.
- En el laboratorio de investigación, el ácido tereftálico se ha popularizado como un componente para la síntesis de estructuras organometálicas.
- El fármaco analgésico oxicodona en ocasiones se presenta como una sal de tereftalato; sin embargo, la sal de oxicodona más habitual es el clorhidrato. Farmacológicamente, un miligramo de tereftalato oxycodona equivale a 1,13 mg de hydrochloridum oxycodonae.
- El ácido tereftálico se usa como relleno en algunas granadas de humo militares, en particular la granada de humo estadounidense M83 y la granada de humo empleada en vehículos M90, que producen un humo blanco espeso que actúa como un oscurecedor en el espectro visual e infrarrojo cercano cuando se quema.

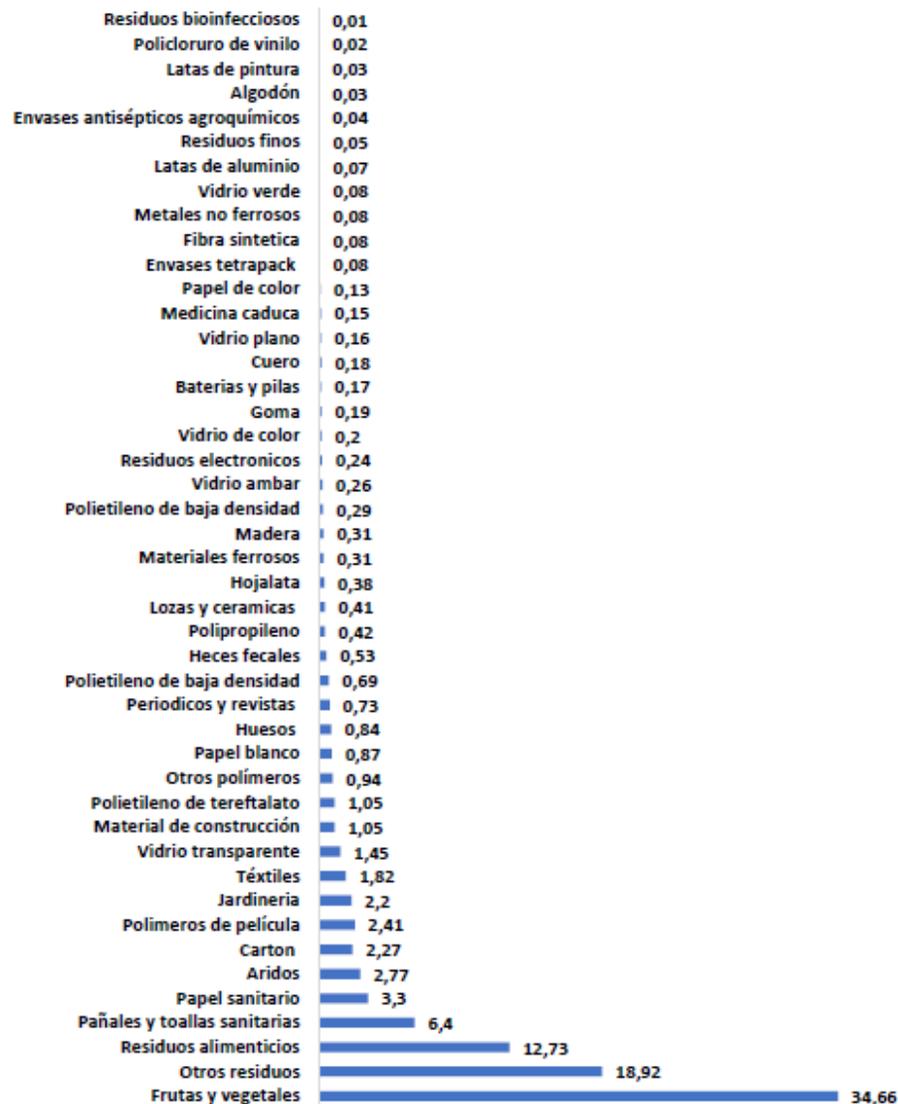
2.2.9. GENERACION DE RESIDUOS SOLIDOS EN LA CIUDAD DE EL ALTO

En el Municipio de El Alto se generan en promedio 693,40 toneladas cada día de residuos sólidos, equivalente a una producción per cápita municipal de 0,77 Kg/hab-día y una generación anual promedio de 265186,98 toneladas de residuos, de los cuales el 74% son residuos generados en domicilios, el 19% en comercios, el 0,06%

en centros de hospedaje, el 1% en instituciones educativas, el 0,3% en instituciones públicas, el 4% en mataderos, el 1,3% en establecimientos de salud y el 0,57% en industrias manufactureras. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2020)

En el 2020, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua realizó un estudio para determinar la tipología de residuos sólidos generados en la ciudad de El Alto, generando así los siguientes datos de la figura. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2020)

Figura 2.22 Clasificación de los residuos sólidos generados en la ciudad de El Alto



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y agua, 2020

De la anterior figura, se puede observar que los residuos sólidos que se generan en mayor cantidad son los residuos orgánicos, sin embargo entre la lista existen diversos materiales plásticos, o también denominados polímeros.

En el caso del PET, la cantidad de Polietileno de Tereftalato como residuo sólido en la ciudad de El Alto es alrededor de 1.05% de los residuos totales generados en la ciudad de manera anual.

2.2.9.1. RECICLAJE DE PET EN LA CIUDAD DE EL ALTO

En la ciudad de El Alto, así como en otras ciudades centrales del país, el reciclaje de polietileno de tereftalato que se realiza es el reciclaje mecánico. Existen en la actualidad varias empresas dedicadas a este rubro quienes consideran al reciclaje como una oportunidad de negocio. Entre las empresas más grandes que cuentan con plantas en la ciudad de El Alto destacan Empacar S.A. y Marecbol S.A.

Empacar S.A. es una empresa de envases, papeles y cartones, y una de sus plantas está en la ciudad de El Alto desde hace más de 10 años, se ubica en el distrito 5 Senkata, su principal labor es el de producir botellas de polietileno de tereftalato al 30% de contenido reciclado (PET 30%PCR) de grado alimentario para la empresa EMBOL (Embotelladoras Bolivianas Unidas S.A.) y también para exportación. (Chuquimia, 2019)

El método de reciclaje que aplica Empacar, es el mecánico y parte desde comprar materia prima reciclada de recolectores quienes lo venden por toneladas, hasta la obtención de preformas PET, las cuales tienen en su composición al menos 30% de resina PET reciclada mecánicamente (RPET). Empacar S.A. envía las preformas a EMBOL, donde la preforma finalmente es soplada para adoptar su forma final.

Marecbol S.A. también es una empresa que realiza reciclaje mecánico y ésta se encuentra en el distrito 2 de la ciudad de El Alto. La empresa adquiere la materia prima reciclada de recolectores y a partir de las mismas obtiene resina reciclada de PET, la producción de preformas o resinas PET es distribuida a empresas de limpieza y alimenticias como Salvietti, mientras que el resto es exportado a Estados

Unidos y Europa. La empresa Marecbol recolecta alrededor de 150 a 180 Ton/mes, de los cuales llega a producir de 15 Ton/mes de preformas plásticas que son comercializados a empresas de limpieza 40% y 60% a empresas alimenticias. (Chuquimia, 2019)

Tabla 2.5 Empresas de envases PET en Bolivia

NOMBRE EMPRESA	LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN
EMPACAR S.A.	El Alto, Santa Cruz, Cochabamba
Marecbol	El Alto
Recicladora impegonal Gonzales e Hijos	El Alto
Madepa	Santa Cruz
Induplast	La Paz
Dulplast	El Alto
Hidroplast	La Paz

Fuente: Elaboración Propia en base a información recopilada, 2022

Así como las empresas Empacar S.A. y Marecbol, existen otras pequeñas empresas que se dedican al reciclaje mecánico del polietileno de tereftalato, no solo en la ciudad de El Alto, sino en varias regiones de Bolivia. Sin embargo se debe destacar que estas empresas aplican el reciclaje mecánico, el cual tiene ciertas limitaciones para poder reciclar algunos envases de polietileno de tereftalato, dejando algunos envases de este material sin la posibilidad de ser reciclados. Es por ello de la necesidad de explorar otras alternativas al reciclaje mecánico, como el reciclaje químico del PET mediante solvolisis y su potencialidad de aplicación en la ciudad de El Alto.

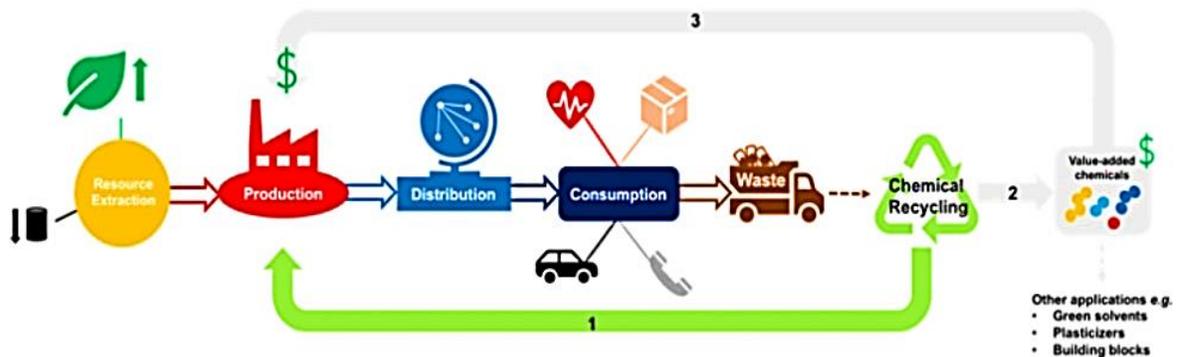
2.2.10. RECICLAJE QUÍMICO Y ECONOMÍA CIRCULAR

En los últimos años, debido a la constante innovación y desarrollo de nuevas tecnologías, el reciclado químico se ha proyectado como una solución adicional al complicado reto de reciclaje de residuos plásticos, siendo complementaria al reciclado mecánico y una alternativa fiable, eficiente y con un menor impacto ambiental que la incineración.

El reciclado químico descompone los residuos plásticos que son difíciles de reciclar u otros tipos de polímeros en sus componentes básicos, que pueden utilizarse para producir nuevos productos químicos o nuevos plásticos. Su aplicación en diversas ciudades, podría representar el incremento de las tasas de reciclado de plásticos, la sustitución progresiva de la extracción de recursos fósiles por la materia prima reciclada generando menores emisiones de CO₂, también una contribución a una economía circular donde el residuo plástico se convierte en materia prima para la industria y que además permitiría obtener productos de la misma calidad equivalente a los procedentes de materia prima fósil.

Es por todo lo anterior mencionado, que se considera al reciclaje químico como una forma de reciclaje que va muy acorde a los principios de desarrollo sostenible y economía circular.

Figura 2.23 Reciclaje Químico de Plásticos en la Economía Circular



Fuente: Extraído de <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cssc.202100400>

Desafortunadamente, lograr el reciclaje químico es un reto mucho mayor que el reciclaje mecánico, ya que no se ha logrado llevar a nivel industrial, a pesar de que se han desarrollado muchas tecnologías. Esto se debe en parte a la falta de comprensión de la tecnología, así como del nivel de apoyo e inversión necesarios en la infraestructura e investigación. Es por ello que el reciclaje químico de plásticos, necesita aún más estudios y divulgación, para que la población conozca que se pueden encontrar otros caminos diferentes al reciclaje típico mecánico para poder disminuir aún más la generación de este tipo de residuos y a dependencia a

productos obtenidos de materias primas nuevas. (The European Chemicals Agency, 2021)

2.2.11. NORMATIVA VIGENTE RELACIONADA AL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

A continuación se hace una recopilación de las secciones de las normativas, leyes, decretos supremos que hacen alusión a la promoción de una correcta gestión de residuos sólidos en el país y que involucraría de igual manera a los residuos de polietileno de tereftalato, dicha normativa fue obtenida de la Gaceta Oficial de Bolivia.

❖ CONSTITUCION POLITICA DEL ESTADO (CPE), 7 de febrero de 2009

En la constitución política del estado, en su artículo 302 señala que, el manejo de los residuos sólidos son competencias exclusivas de los gobiernos municipales autónomos en su jurisdicción. Indicando que son los municipios quienes deben gestionar los residuos que generan.

❖ LEY DE MEDIO AMBIENTE (LEY N° 1333), 27 de abril de 1992

También se tiene a la Ley de Medio Ambiente, la cual en su artículo 83 señala que las universidades autónomas y privadas deben orientar sus programas de estudio y de formación técnica y profesional en la perspectiva de contribuir al logro del desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente. En este caso el presente proyecto de investigación, tiene la intención de evaluar otra alternativa para reciclar de manera más eficiente residuos sólidos como el polietileno de tereftalato (PET), que vaya acorde a los principios del desarrollo sostenible y economía circular.

❖ LEY MARCO DE LA MADRE TIERRA Y DESARROLLO INTEGRAL PARA VIVIR BIEN (Ley N° 300), 15 de octubre de 2012

La ley de la Madre Tierra y desarrollo integral para vivir bien, señala en el Artículo 31, que la gestión de residuos sienta las bases y orientaciones del Vivir Bien, a través del desarrollo integral en gestión de residuos son:

- Promoviendo la transformación de los patrones de producción y hábitos de consumo en el país y la recuperación y reutilización de los materiales y energías contenidos en los residuos, bajo un enfoque de **gestión cíclica** de los mismos.
- Desarrollando mecanismos institucionales, técnicos y legales de prevención, **disminución y reducción** de la generación de los residuos, su utilización, reciclaje tratamiento, disposición final sanitaria y ambientalmente segura, en el marco del Artículo 299 parágrafo II numerales 8 y 9 de la Constitución Política del Estado.
- Garantizando el manejo y tratamiento de residuos de acuerdo a Ley específica.
- Desarrollando **acciones educativas** sobre la gestión de residuos en sus diferentes actividades para la concienciación de la población boliviana.

❖ **LEY DE GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS (LEY N° 755), de 28 de octubre de 2015**

En su artículo 8, menciona que en la aplicación de la Gestión Integral de Residuos, el nivel central del Estado y las entidades territoriales autónomas, deben orientar sus acciones, en orden de importancia, a:

- Prevenir para reducir la generación de residuos.
- **Maximizar** el aprovechamiento de los residuos.
- **Minimizar** la disposición final de los residuos, restringiendo en lo posible sólo para aquellos residuos no aprovechables.

En el presente proyecto, se evaluara una forma de reciclaje químico, como la solvolisis, que se enfocara en la **maximización** del aprovechamiento del residuo post consumo de PET, lo cual a su vez fomentaría la **minimización** de la disposición de estos residuos en botaderos o rellenos sanitarios.

❖ **DECRETO SUPREMO N° 2887, 31 DE AGOSTO DE 2016**

En su artículo primero señala que las empresas que producen botellas PET, deben obligatoriamente incluir en la cadena productiva material PET-PCR grado

alimentario en al menos treinta por ciento (30%), cumpliendo los procedimientos establecidos en la normativa vigente. Además los envasadores para la comercialización de sus productos, deberán utilizar botellas PET-PCR grado alimentario.

Este último decreto lo que hace es fomentar el reciclaje mecánico del PET, así como la utilización del materia reciclado, siendo este un buen antecedente para en un futuro considerar la promoción del reciclaje químico de este mismo tipo de residuo.

❖ **LEY MUNICIPAL DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL ALTO (LEY 547)**

Actualmente cuenta con una Ley municipal de residuos vigentes, denominada Ley N°547, la cual solamente establece los límites territoriales necesarios para el buen funcionamiento del botadero de Villa Ingenio. Como se hace mención la ciudad de EL Alto solamente cuenta con un relleno sanitario, que consta del depósito de residuos sólidos y el recubrimiento con tierra de los mismos, mínimamente estos sitios deben cumplir con principios básicos como el control de los líquidos y lixiviados, generados por el proceso de descomposición de los sólidos, así como de los gases producidos, sustancias que pueden generar daños a los mantos acuíferos y al ambiente. (Gobierno Autonomo Municipal de El Alto, 2019)

De la normativa revisada relacionada al proyecto de investigación, se puede evidenciar que existen leyes y decretos que impulsan la gestión de residuos en el país, y que cada municipio debería buscar soluciones para prevenir, maximizar el aprovechamiento de los residuos generados y minimizar la cantidad de residuos que termina en los rellenos sanitarios o botaderos. Sin embargo, muchas ciudades no cumplen a cabalidad estas leyes, incluyendo la ciudad de El Alto, no priorizando la maximización del aprovechamiento de residuos, es por ello que el presente proyecto de investigación quiere convertirse en una propuesta de alternativa para el aprovechamiento de residuos como el PET mediante el reciclaje químico por solvolisis.

2.3. ENFOQUE ELEGIDO POR EL INVESTIGADOR

En base a la revisión del estado del arte realizado, se identifica al reciclaje químico del PET como aquel que posibilita la obtención de compuestos que han sido la materia prima de origen para la obtención de resina PET virgen, y que mediante la solvólisis se puede obtener diversos compuestos, por ejemplo, mediante la metanolisis se puede obtener dimetiltereftalato (DMT) y etilenglicol (EG), mediante la glicolisis se puede obtener tereftalato de bis (2-hidroxietileno) (BHET) y etilenglicol (EG), mediante la aminolisis y la amonolisis se puede obtener amidas y otros compuestos además de etilenglicol (EG) y finalmente de la hidrolisis se puede obtener ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG).

De todos los métodos de solvolisis mencionados se identifica a la hidrolisis como el único método que podría generar como producto al ácido tereftálico (TPA) de manera directa. Es por ello que en el presente trabajo de investigación, el cual tiene como principal objetivo obtener ácido tereftálico (TPA), se decide tener el enfoque de estudio en específico al método de ***solvolisis por hidrolisis de PET*** ya que es el único que nos permite obtener de manera directa este compuesto.

Además, se conoce la importancia de desarrollar la investigación teniendo en cuenta los principios de la economía circular, entendiendo que el desarrollo de tecnología y métodos de reciclaje químico de residuos plásticos tiene como principal beneficio la disminución de desechos que van a parar a los rellenos sanitarios, botaderos, ríos, entre otros, y que permite obtener materia prima que ayude a producir productos de la misma calidad que los productos obtenidos de materia prima fósil virgen.

2.4. IDENTIFICACION DE LAS FUENTES

A continuación se hace la mención de las principales fuentes bibliográficas utilizadas en el trabajo de investigación:

- Ali, S., Elsamahy, T., Koutra, E., Kornaros, M., El-Sheekh, M., Abdelkarim, E., Sun, J. (2021). Degradation of conventional plastic wastes in the

environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal.

- Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. (2015). Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate.
- Bartolome, L., Imran, M., Cho, B., Al-Masry, W., & Kim, D. (2012). Recent developments in the chemical recycling of PET, material recycling – trends and perspectives.
- Elgegren, M., Tiravanti, G., Ortiz, B., Otero, M., Wagner, F., Cerron, D., & Nakamatsu, J. (2012). Reciclaje químico de Desechos Plásticos.
- Francis, R. (2016). Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications.
- Guapisaca Siguenza, A. C., & Pintado Barbecho, F. A. (2019). Valoración de Metodos Quimicos para obtener Acido Tereftalico a partir de Tereftalato de polietileno PET.
- Morales Palomino, J. (2010). Proceso de recuperación del ácido tereftálico y el etilenglicol del PET reciclado.
- Pinos, J. A. (2019). Valoración de métodos químicos para obtener ácido tereftálico de polietileno PET.
- Suasnavas Flores, D. F. (2017). Degradación de materiales plásticos “PET” (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión.
- The European Chemicals Agency. (Agosto de 2021). Chemical Recycling of Polymeric Materials from Waste in Circular Economy.
- Vargas Santillán, A. (2019). Analisis de Reciclado Quimico de Plasticos (PE y PET) para la obtencion de Productos con Valor Agregado en Mexico. Michoacan - Mexico: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.

CAPITULO 3. MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo, se presenta el tipo de metodología de investigación a utilizarse en este trabajo de investigación.

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Una investigación cuantitativa, es aquella que consiste en recolectar y analizar datos numéricos, siendo un método ideal para identificar tendencias y promedios, realizar predicciones, comprobar relaciones y obtener resultados generales de poblaciones grandes. La investigación cuantitativa es un método estructurado de recopilación y análisis de información que se obtiene a través de diversas fuentes y este proceso se lleva a cabo con el uso de herramientas estadísticas y matemáticas con el propósito de cuantificar el problema de investigación. (Ramos, 2012)

Teniendo en cuenta el concepto anterior, el proyecto titulado “Obtención de ácido tereftálico por solvolisis a partir de polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto”, que se plantea en el presente trabajo de investigación se enmarca en la metodología cuantitativa, la cual se refiere a que la investigación produce datos cuantitativos, como por ejemplo: estadísticas numéricas relacionadas al reciclaje de residuos post consumo de polietileno de tereftalato (PET), así como información obtenida de prácticas experimentales en laboratorio. También se desarrollan conceptos, teorías, hipótesis y preguntas, en donde el equipo de investigación, en base a los datos obtenidos, realiza un análisis de la propuesta realizada y evalúa las perspectivas del tema estudiado.

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Dentro de la investigación cuantitativa, el presente trabajo de investigación se identifica como descriptiva – experimental. La investigación cuantitativa descriptiva busca describir el estado actual de una variable identificada, en este tipo de investigación no se suele comenzar con una hipótesis, pero es probable que se desarrolle una después de recoger los datos. (Madriz, 2015)

La investigación cuantitativa experimental, es utilizada para probar una hipótesis o premisa experimental. Esta investigación depende básicamente de una teoría. Puede haber múltiples teorías en una investigación experimental. Cabe mencionar que una teoría es una declaración que puede ser verificada o refutada, después de establecer la declaración, se realizan otras tareas para comprender si la teoría es válida o no. (Ramos, 2012)

En base a los conceptos anteriormente es que para el diseño de la investigación se realizan las siguientes acciones, distribuidas en fases para el desarrollo y cumplimiento óptimo de los objetivos de la presente investigación cuantitativa:

- I. La ejecución de una investigación documental y de campo acerca del envase de plástico PET, síntesis, propiedades, usos, destino como residuo y procesos de recuperación y reciclaje disponibles dentro del contexto actual, así como el estudio del ácido tereftálico y su obtención en laboratorio.
- II. El estudio de la percepción de los habitantes y/o personas que desarrollen actividades económicas o académicas en la ciudad de El Alto, sobre el conocimiento que tienen sobre los envases PET y sus formas de reciclaje.
- III. La obtención de ácido tereftálico a partir de diferentes envases que sean residuos post consumo de PET mediante el reciclaje químico por el método de solvolisis a escala laboratorio.
- IV. La evaluación de la potencialidad de las prácticas realizadas en laboratorio como alternativa para el reciclaje de residuos post consumo de PET en la ciudad de El Alto.

3.3. VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

Las variables en un estudio de investigación constituyen todo aquello que se mide, la información que se colecta o los datos que se recaban con la finalidad de responder las preguntas de investigación, las cuales se especifican en los objetivos. Su selección es esencial de los protocolo de investigación. (Miranda Novales & Villasís Kever, 2016)

De acuerdo a las fases para el desarrollo y cumplimiento óptimo de los objetivos de la presente investigación cuantitativa descritos anteriormente, se procede a identificar las variables a tomar en cuenta en la presente investigación.

Tabla 3.1 Definición de variables de investigación

Marco	Tipo de variable	Variables	Unidad de medida
Social	Independiente	Población de la ciudad de El Alto	Personas
	Independiente	Cantidad de residuos generados al año en la ciudad de El Alto	Toneladas/año
	Independiente	Prácticas de manejo de residuos PET en la ciudad de El Alto	Adimensional
Experimental en laboratorio	Independiente	Cantidad de residuo PET triturado	Kilogramo, gramos
	Independiente	Cantidad de hidróxido de sodio requerido	Kilogramo, gramos
	Independiente	Cantidad de ácido sulfúrico requerido	Litro, mililitro
	Independiente	Cantidad de agua destilada requerida	Litro, mililitro
	Independiente	Cantidad de Etanol requerido	Litro, mililitro
	Dependiente	Cantidad de ácido tereftálico recuperada.	Kilogramo, gramos
	Dependiente	Rendimiento de la reacción de despolimerización.	Porcentaje (%)
	Controlada	Presión	Atmosferas
	Controlada	Temperatura	Centígrados
Económico	Independiente	Costos reactivos utilizados	Bolivianos (Bs)
	Dependiente	Efectos de los costos de reactivos en el precio del producto final (TPA)	Adimensional

Fuente: Elaboración Propia, 2022

En el marco social, se identifican variables que permiten el estudio de la percepción de los habitantes de la ciudad de El Alto sobre los envases PET y sus formas de reciclaje, en el marco experimental, se identifican variables que deben ser tomadas en cuenta durante el trabajo práctico en laboratorio y en el marco económico se identifican variables que permiten estudiar la potencialidad de aplicación en la ciudad de El Alto de alguno de los métodos evaluados en laboratorio.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

Tomando como dato inicial que el municipio de El Alto tiene 1.098.100 habitantes, proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística en el 2022, es que se procede a realizar los cálculos de tamaño de muestra de población para realizar la recolección de información. Para el cálculo de tamaño de muestra para la encuesta a realizar, se tomara en cuenta el dato anterior relacionado a la población de la ciudad de El Alto, siendo entonces un universo finito, es decir contable y la variable de tipo categórica.

Para ello, se utiliza una herramienta estadística, denominada muestreo aleatorio simple que utiliza la distribución normal para este tipo de casos, en el caso de las encuestas mientras mayor sea el número de encuestas mayor será el nivel de confianza y viceversa si fuera menor la cantidad de encuestados, la fórmula para determinar el número de encuestados es la siguiente (Alicante, 2017)

Ecuación 3.1 Ecuación para cálculo de tamaño de muestra finita

$$n = \frac{K^2 N P q}{e^2(N - 1) + (K^2 P q)}$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra = Numero de encuestados

K = Constante que depende del nivel de confianza que asignemos

N = Poblacion

P = Probabilidad a favor

q = Probabilidad en contra

e = Error muestral

Utilizando la ecuación anterior tenemos

K = 1.96 (obtenido de la Campana de Gauss, distribución normal)

N = 922.598 (Poblacion Ciudad de El Alto, 2018)

P = 0.5 (para muestra poblacional recurrente , sampieri 2003)

$q = 0.5$ (para muestra poblacional recurrente, sampieri 2003)

$$e = 0.05$$

$$n = \frac{1.96^2 * 1.098.100 * 0.5 * 0.5}{0.05^2(1.098.100 - 1) + (1.96^2 * 0.5 * 0.5)}$$

$$n = 384.03$$

Tamaño de la muestra = Numero de encuestados = 385 personas

De acuerdo al cálculo realizado, teniendo en cuenta como dato que la población de la ciudad de El Alto es de 1.098.100 personas, se concluye que la muestra de la encuesta para que se tenga una nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, se deben encuestar a al menos a **385 personas** que vivan en la ciudad de El Alto.

3.5. AMBIENTE DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se va a diferenciar según se la realice sobre el terreno o en el laboratorio, en el caso del presente proyecto de investigación denominado “Obtención de ácido tereftálico a partir de polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto”, el ambiente de investigación será en el laboratorio. En el laboratorio los factores que influyen sobre los resultados del estudio pueden elucidarse en forma más fácil y efectiva. Sin embargo presenta la dificultad de la generalización de los datos obtenidos, es decir, la complejidad que implica el asegurarse de que lo que ocurre en el ambiente extremadamente artificial de un laboratorio sucederá también en bajo condiciones reales.

A pesar de las dificultades que se puedan presentar en el ambiente de investigación de laboratorio, el presente proyecto pretende ser un aporte académico para el área de estudio de reciclaje químico en la ciudad de El Alto. Los datos obtenidos podrán ser utilizados como antecedentes a futuros proyectos relacionados.

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Las técnicas e instrumentos de investigación son los procesos e instrumentos utilizados en el abordaje y estudio de un determinado fenómeno, hecho, persona o grupo social. Con estos métodos, los investigadores pueden recopilar, examinar, analizar y exponer la información con la que se han encontrado. Es a partir de estos procesos por los cuales las investigaciones consiguen satisfacer su principal objetivo, que es el de adquirir nuevo conocimiento y expandir la ciencia (Coorbeta, 2013)

En una investigación cuantitativa, las técnicas e instrumentos se utilizan para realizar un proceso de recolección de datos efectivo, y estas se aplican a muestras de gran tamaño, de igual manera permiten recolectar respuestas objetivas de las muestra de estudio, para que estas tengan la posibilidad de replicarse, ya que son confiables (*Nahoum, 2015*)

En este trabajo de investigación se utilizan las siguientes técnicas:

- ❖ Compilación literaria
- ❖ Encuesta o estudio de la percepción de la comunidad
- ❖ Practica experimental en laboratorio
- ❖ Análisis de datos cuantitativos

A continuación, se procede a describir a cada una de las técnicas de investigación a ser utilizadas, así como la mención de los instrumentos en los que se apoyan para su ejecución.

- **Compilación literaria:** La información se obtiene a través de la compilación literaria en base a la revisión de trabajos escritos, gráficos, etc disponibles en la web. Los documentos que utilizan como fuente de datos son: libros, leyes, y artículos científicos principalmente y su utilización favorece el conocimiento sobre el contexto de la obtención del ácido tereftálico mediante el reciclaje de polietileno de tereftalato (PET). La compilación literaria se realiza con el registro de páginas electrónicas, y así mediante el internet se puede

recopilar, revisar y analizar gran cantidad de información que ha sido digitalizada y almacenada en distintas bases electrónicas de datos

- **Encuesta:** Esta es una técnica de valoración que consiste en conocer la tendencia u opiniones de un grupo de personas sobre alguna temática especial, en este caso la información que tienen los habitantes de la ciudad de El Alto sobre el polietileno de tereftalato y sus formas de reciclaje. Esta técnica se lleva a cabo tomando una muestra de habitantes o personas que habitan y/o realizan sus actividades económicas y académicas en la ciudad de El Alto, explorando sus conocimientos sobre los envases PET, y si conocen diversas formas de su aprovechamiento.

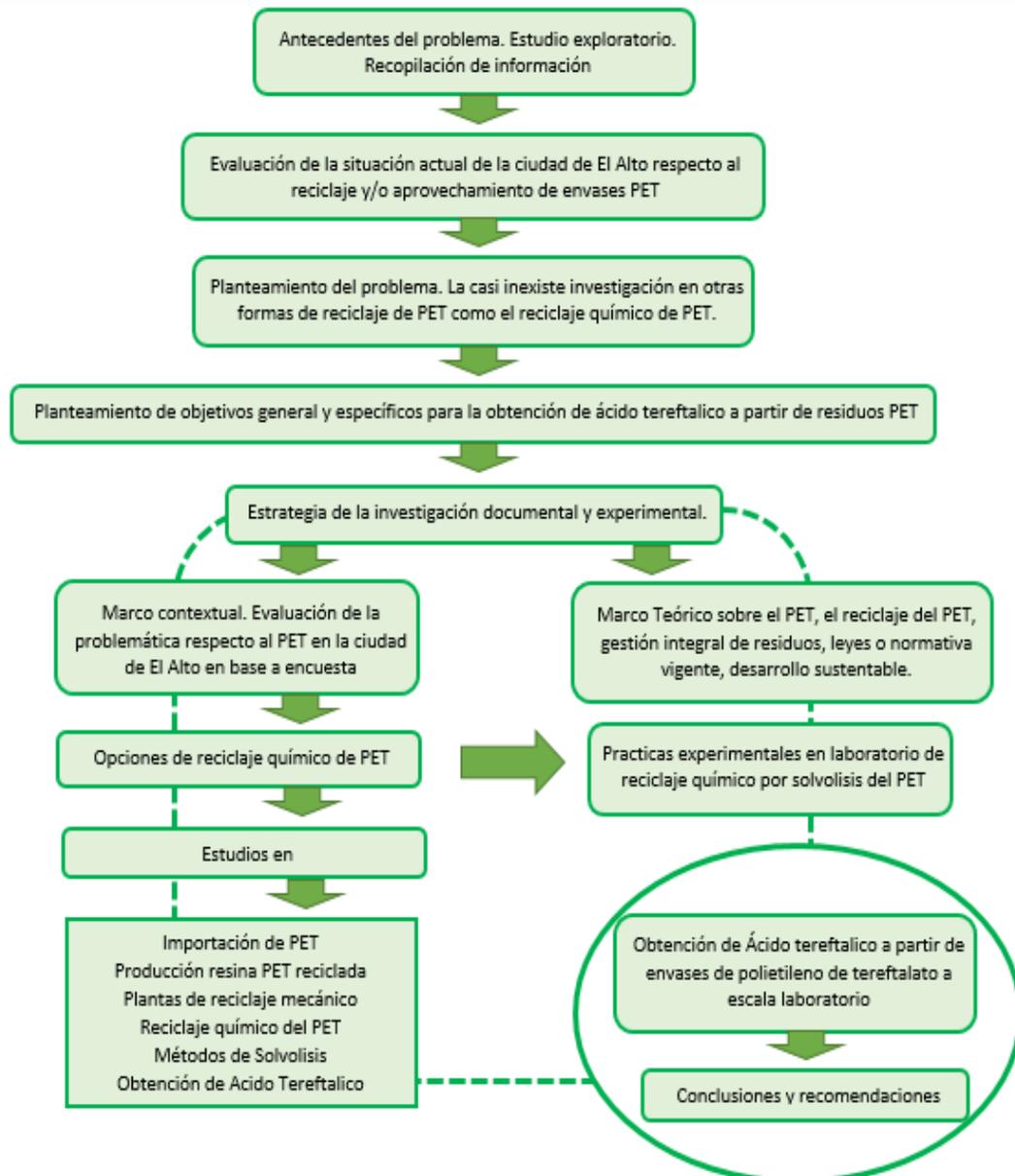
- **Práctica experimental en laboratorio:** Es una técnica que permite la obtención de datos mediante la realización de pruebas experimentales en laboratorio de reciclaje químico del PET para la obtención de ácido tereftálico mediante el método de solvolisis, evaluando este método como alternativa de reciclaje de residuos post consumo de PET generado en la ciudad de El Alto. Esta técnica se utiliza en la fase de desarrollo de la investigación de manera que se pueda explorar otra de las formas de reciclaje de PET, aportando datos relevantes para el proyecto de investigación.

- **Análisis de datos cuantitativos:** Es la técnica de utilizar métodos estadísticos para describir, resumir y comparar datos, y cuyo análisis puede variar dependiendo de los tipos de datos recopilados. El análisis de los datos cuantitativos hace que los resultados de la investigación sean más comprensibles. En el presente trabajo de investigación, se realiza el análisis tanto de los datos recopilados de la encuesta, así como de los datos obtenidos en laboratorio.

3.7. PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

El procedimiento a desarrollarse en la presente investigación puede resumirse en el siguiente diagrama de la Figura.

Figura 3.1 Esquema metodológico de la investigación



Fuente: Elaboración propia, 2022

CAPITULO 4. RESULTADOS

El universo de estudio del presente proyecto de investigación es la ciudad de El Alto, ciudad que se ha caracterizado por tener un gran incremento demográfico en los últimos años, lo cual a la vez ha implicado una mayor generación de residuos, entre ellos el polietileno de tereftalato (PET).

Figura 4.1 Distritos de la ciudad de El Alto



Fuente: Extraído de elaltobo.com, 2017

La ciudad de El Alto está conformada por 14 distritos y algunas proyecciones poblacionales al 2022 señalan que el municipio de El Alto tiene una población

aproximada de 1.098.100 de habitantes, informó el Instituto Nacional de Estadística al celebrar el 37 aniversario de este municipio. (Instituto Nacional de Estadística, 2022).

4.1. GENERACION DE RESIDUOS PET EN LA CIUDAD DE EL ALTO

De acuerdo al último censo nacional del 2012, en 256.852 viviendas de El Alto indicaron que mayormente depositan sus residuos en el basurero o contenedor público, en 163.156 viviendas indicaron que los desechan en un terreno baldío o directamente en la calle, 49.425 viviendas indicaron que utilizan el servicio público de recolección (carro basurero en horarios establecidos), 24.041 viviendas indicaron que tiran sus residuos al río, 9560 la queman, 7.907 la entierran y 1018 viviendas mencionaron otras formas de desechos sus residuos. (Instituto Nacional de Estadística, 2012)

Figura 4.2 Número de viviendas, por forma de eliminación de la basura



Fuente: Instituto Nacional de Estadística, 2012

Como se puede observar de la figura anterior, no se evidencia de alguna forma de eliminación de basura relacionada al reciclaje de algunos tipos de residuos que se generaban en la ciudad de El Alto para ese entonces.

De igual manera, de acuerdo a la Dirección Integral de Residuos del Gobierno Municipal de El Alto, la cantidad en peso de residuos sólidos generados en la ciudad han ido aumentando año tras año, de los cuales el 10% aproximadamente representa a la cantidad de residuos plásticos. (Dirección de Gestión Integral de Residuos, 2022)

En la siguiente tabla se observa, los pesos anuales de residuos sólidos generados en la ciudad de El Alto en Toneladas Métricas y el correspondiente peso referente a los plásticos residuales.

Tabla 4.1 Pesos Anuales de Residuos Sólidos generados en la ciudad de El Alto

AÑO	PESO (TM)	PESO PLASTICOS (TM)
2016	122.840.87	12.284.09
2017	206.980.84	20.698.08
2018	258.714.47	25.871.45
2019	250.425.22	25.042.52
2020	267.459.45	26.745.94
2021	265.915.59	26.591.56

Fuente: Dirección de Gestión Integral de Residuos, 2022

La cantidad de plásticos residuales en el 2021 en la ciudad de El Alto, habría sido de 26.591.56 toneladas métricas aproximadamente, sin embargo en esta misma categoría se encuentran distintos tipos de polímeros o mejor conocidos como plásticos, como el PET, poliestireno, polietileno de alta y baja densidad, entre otros.

De acuerdo a los datos proporcionados por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua en el 2020, se conoce que de manera aproximada, la composición física de los residuos poliméricos de diferente origen generados en la ciudad de El Alto es:

- Polietileno tereftalato PET 1,05%
- Polietileno de baja densidad 0,69%
- Polietileno de alta densidad 0,29%
- Polipropileno 0,42%
- Plástico rígido PVC 0,02%
- Otros plásticos tipo película 2,41%
- Otros plásticos 0,94%

Manejando estos porcentajes, los residuos de tereftalato de polietileno representan el 1.05% de todos los residuos sólidos generados en la ciudad de El Alto.

Con estos datos proporcionados, podemos calcular aproximadamente la cantidad de toneladas métricas generadas en la ciudad de El Alto de residuos de polietileno de tereftalato en el 2021.

Ecuación 4.1 Ecuación de cálculo de peso de residuos PET en El Alto en 2021

$$\begin{aligned} & \text{Peso de Residuos solidos generados el 2021} * \text{Fraccion porcentual de residuos PET} \\ & = \text{Peso de Residuos PET generados el 2021} \end{aligned}$$

Aplicando la anterior ecuación, se tiene:

$$265915.59 \text{ TM} * 0.0105 = 2792.11 \text{ TM}$$

Generando así la siguiente tabla.

Tabla 4.2 Peso de residuos de Polietileno de Tereftalato en la ciudad de El Alto en 2021

AÑO	PESO RESIDUOS SOLIDOS (TM)	PESO POLIETILENO DE TEREFTALATO (TM)
2021	265.915.59	2792.11

Fuente: Elaboración Propia en base a datos recopilados, 2022

De acuerdo a los cálculos realizados, en el 2021 se habrían generado aproximadamente 2792.11 toneladas métricas de envases de polietileno de tereftalato (PET), en la ciudad de El Alto, el cual será un dato inicial para realizar futuros cálculos y evaluar la potencialidad de los residuos PET como materia prima.

Sin embargo, a pesar de los cálculos anteriores, es importante realizar un estudio de campo, que de alguna manera nos permita corroborar la información recopilada y es por ello que es necesario conocer como los habitantes de la ciudad de El Alto perciben el reciclaje del polietileno de tereftalato (PET) en su ciudad.

4.2. PERCEPCION SOBRE EL RECICLAJE DE RESIDUOS PET EN LA CIUDAD DE EL ALTO

Es importante para el proyecto de investigación, obtener información de la percepción del ciudadano alteño sobre aspectos relacionados al polietileno de

tereftalato o más conocido como PET. Por ejemplo si sabe reconocer este tipo de polímero en diversos envases de productos, las formas de reciclaje de este tipo de material disponible en nuestro medio, o si conoce de algunas formas novedosas de reciclaje de este polímero que no sean reciclaje mecánico. Es por ello que se ha elaborado una encuesta virtual denominada “*Reciclaje de residuos PET en El Alto*”, con el objetivo de obtener la información antes mencionada y de esta manera sustentar la necesidad de llevar a cabo la investigación propuesta en este proyecto.

4.2.1. ENCUESTA VIRTUAL “RECICLAJE DE RESIDUOS PET EN EL ALTO”

En el mes de Junio se elaboró la encuesta virtual utilizando Google Forms con el principal objetivo de obtener información primaria acerca de cómo los habitantes de la ciudad de El Alto, perciben el reciclaje de residuos de polietileno de tereftalato (PET).

Del cálculo realizado en el capítulo anterior para conocer la población muestra necesaria para realizar la encuesta, y que ésta tenga un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 95%, la cantidad mínima de encuestados debe ser de 385 personas, número que se vio superado, logrando encuestar a 398 personas.

A continuación se muestran con detalle los resultados obtenidos de dicha encuesta.

4.2.1.1. RESULTADOS ENCUESTA VIRTUAL

Los diferentes resultados que se presenta a continuación están en base a las diez preguntas. En los siguientes párrafos se desglosan los resultados de cada una de estas preguntas.

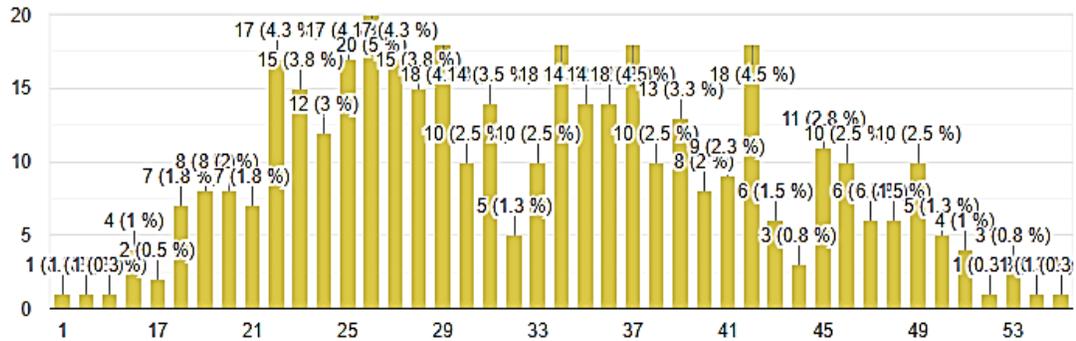
➤ Pregunta 1 - EDAD

La primera pregunta consulta la edad de los encuestados, y de ésta se puede observar que los encuestados se encuentran en su mayoría entre las edades de 22 a 31 años y 34 a 49 años.

Figura 4.3 Gráfico de edades promedio de los encuestados

Edad

398 respuestas



Fuente: Encuesta Virtual Reciclaje de Residuos PET en El Alto, 2022

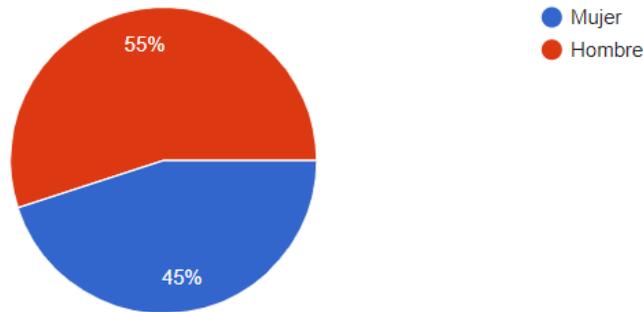
➤ **Pregunta 2 - SEXO**

La mayoría de encuestados corresponde al 55% de Hombres y un 45% de Mujeres.

Figura 4.4 Gráfico Sexo de personas encuestadas

Sexo

398 respuestas



Fuente: Encuesta Virtual Reciclaje de Residuos PET en El Alto, 2022

➤ **Pregunta 3 – DISTRITO AL QUE PERTENECE**

Teniendo en cuenta que la ciudad de El Alto está conformado por 14 distritos, se procuró difundir la encuesta de manera que haya respuestas de encuestados que pertenezcan a los 14 distritos. En la siguiente tabla se sintetiza la cantidad de encuestados por distrito.

Tabla 4.3 Distrito de la ciudad de El Alto al que pertenecen los encuestados

DISTRITO	ENCUESTADOS	DISTRITO	ENCUESTADOS	DISTRITO	ENCUESTADOS
1	36	6	23	11	28
2	43	7	28	12	17
3	25	8	44	13	25
4	19	9	26	14	16
5	46	10	22		

Fuente: Encuesta Virtual Reciclaje de Residuos PET en El Alto, 2022

En la tabla anterior, se puede observar a la cantidad de encuestados por distrito, dando un total de **398** personas, superando así la muestra de población necesaria que es de 385 personas. Las personas de los distritos 1,2,5 y 8, fueron las que más contestaron la encuesta, y también se resalta que la encuesta pudo obtener respuestas de todos los distritos de la ciudad de El Alto

➤ **Pregunta 4– CONOCIMIENTO SOBRE LA CODIFICACIÓN PET**

Figura 4.5 Ejemplos de envases PET y como reconocerlos, mostrados en la encuesta



Fuente: Elaboración Propia, 2022

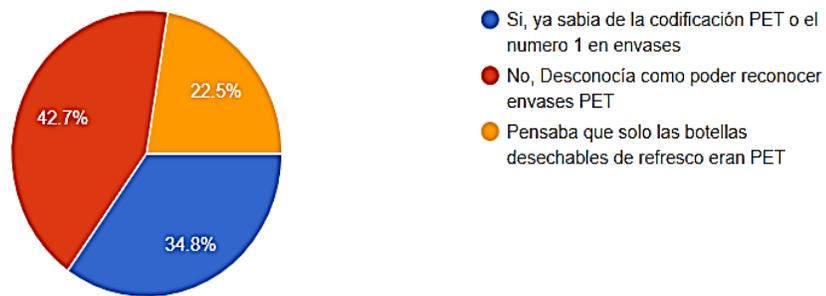
Antes de comenzar con las preguntas específicas al tema de estudio, en la encuesta se muestra una pequeña sección informativa, en el cual se muestran imágenes sobre algunos tipos de envases que suelen ser de material PET, y que no solo se limitan a las típicas botellas de gaseosas y agua, sino que también suelen ser envases de diversos productos muy utilizados en el hogar. También en esta sección se informa como se puede reconocer este tipo de material mediante la codificación universal que indica que el número 1 corresponde a envases PET.

Luego de esta pequeña sección informativa, se pregunta al encuestado si esta información sobre la codificación PET era de su conocimiento con anterioridad, o es que es algo de lo que se acaba de enterar gracias a la encuesta.

Figura 4.6 Grafico conocimiento sobre la codificación PET

Antes de la presente encuesta ¿Usted sabía reconocer cuando un envase está elaborado de plástico PET?

396 respuestas



Fuente: Encuesta Virtual Reciclaje de Residuos PET en El Alto, 2022

Los resultados de esta pregunta fueron los siguientes: Un 42.7% de los encuestados indicó no haber conocido con anterioridad el cómo poder reconocer un envase PET, un 34.8% indicó que si conocía como reconoce un envase PET y un 22.5% indicó que para ellos los envases PET solo eran las típicas botellas de gaseosa o agua.

➤ **Pregunta 5 – FRECUENCIA CON LA QUE UTILIZA EL PET**

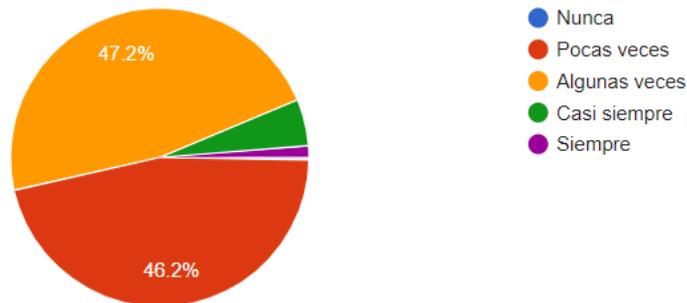
En esta pregunta el encuestado debía indicar sobre cuál es la frecuencia con la que usa envases PET. En este caso, los tres porcentajes más representativos corresponden al 47.2% que indica que las personas de la ciudad de El Alto utilizan

envases PET algunas veces, un 46.2% indica que pocas veces han usado envases PET, y un 5.1% indica que casi siempre utilizan este tipo de material.

Figura 4.7 Grafico frecuencia con la que utiliza el PET

Ya conociendo que envases pueden ser de plástico PET ¿Con qué frecuencia diría que usa envases de este material?

396 respuestas



Fuente: Encuesta Virtual Reciclaje de Residuos PET en El Alto, 2022

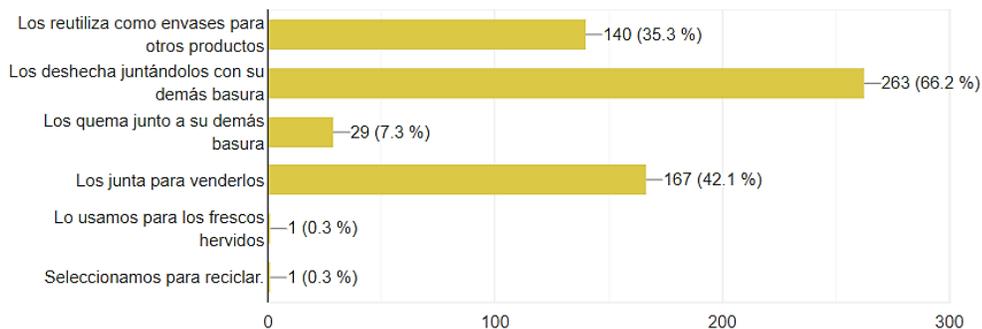
➤ Pregunta 6 – QUE HACE CON LOS RESIDUOS PET

Esta pregunta también fue de gran relevancia para el proyecto de investigación, ya que su propósito es conocer como los ciudadanos alteños disponen de los residuos PET. Un 66.2% indica que los desecha juntándolos con su demás basura, un 42.1% indica que los junta para venderlos, un 35.3% indica que los reutiliza como envases para otros productos.

Figura 4.8 Grafico que hace con los residuos PET

¿Qué hace con envases PET que quedan vacíos y se convierten en residuos en su hogar? (Puede escoger mas de una opción)

397 respuestas



Fuente: Encuesta Virtual Reciclaje de Residuos PET en El Alto, 2022

En esta pregunta, el encuestado tenía la opción de marcar más de una opción, ya que así como era probable que el encuestado deseche parte de sus residuos PET con su demás basura puede que las botellas PET de gaseosa si las haya juntado para venderlas, o puede que además de juntar envases PET para su venta, también busque como reutilizarlos para otros productos.

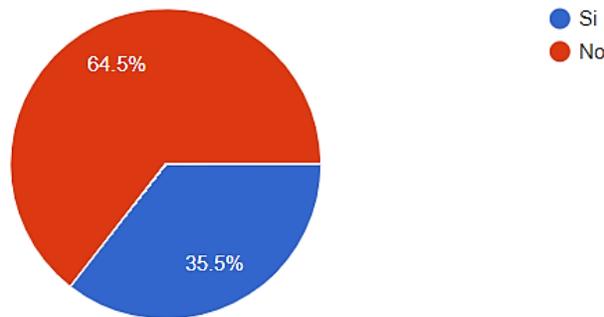
➤ **Pregunta 7 - CONCIENCIA SOBRE EL RECICLAJE DE PET EN SU MEDIO**

Esta pregunta se refiere a si en el entorno de los encuestados existe la conciencia sobre el reciclaje de residuos plásticos. El 64.5% indica que en su entorno no hay conciencia sobre el reciclaje y el 35.5% indica que si existe en su entorno conciencia sobre el reciclaje.

Figura 4.9 *Grafico conciencia sobre el reciclaje de PET en su medio*

¿En su entorno existe conciencia sobre la importancia del reciclaje de residuos plásticos?

397 respuestas



Fuente: Encuesta Virtual Reciclaje de Residuos PET en El Alto, 2022

➤ **Pregunta 8 – CONOCIMIENTO SOBRE EL DESTINO DE LOS ENVASES PET RECOLECTADOS**

El tipo de reciclaje más común aplicado a envases PET en nuestro medio es el reciclaje mecánico, ya que existen algunas empresas dedicadas a este rubro en la ciudad de El Alto y es a éstas empresas donde van a parar la mayoría de los envases PET recolectados en la ciudad. Es por ello de la importancia de esta

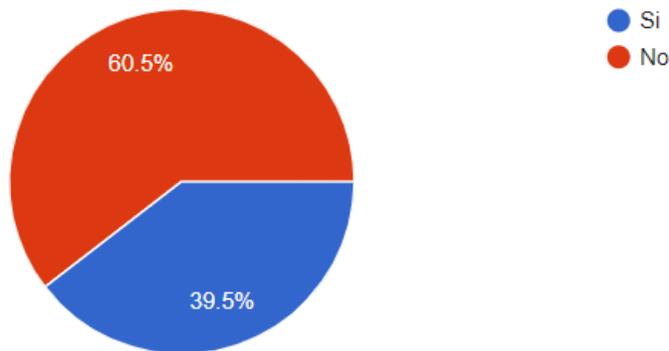
pregunta, que pretende conocer si el encuestado conoce que sucede con aquellos envases que son recolectados manualmente por personas dedicadas a la recolección de material reciclable como el PET.

Los resultados obtenidos en esta pregunta indican que el 60.5% de los habitantes de la ciudad de El Alto desconoce sobre los procesos que atraviesa un envase PET recolectado y vendido a estas empresas de reciclaje mecánico de PET, mientras que el 39.5% indica si conocer cuál es el destino de estos envases recolectados de PET.

Figura 4.10 Grafico conocimiento sobre los envases PET recolectados

Seguro conoce que hay personas que se dedican a recolectar residuos PET. ¿Sabe usted cual es el destino de estos envases recolectados? ¿Dónde son llevados? ¿Quiénes y a que procesos de reciclaje someterán a estos envases?

397 respuestas



Fuente: Encuesta Virtual Reciclaje de Residuos PET en El Alto, 2022

➤ **Pregunta 9 – CONOCIMIENTO SOBRE OTRAS FORMAS DE RECICLAJE DE PET**

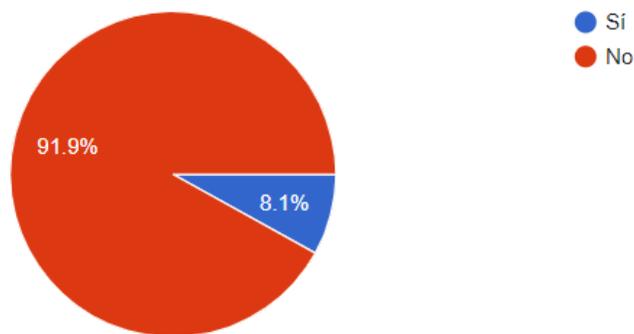
Esta pregunta es una de las más relevantes de la encuesta realizada, ya que pretende conocer si la población alteña está informada de otras alternativas de reciclaje de envases PET, que sean diferentes al reciclaje mecánico, como el reciclaje energético o el reciclaje químico.

Los resultados obtenidos indican que el 91.9% desconoce de otras alternativas de reciclaje de PET, mientras que el 8.1% indica saber de otras formas de reciclaje de envases PET.

Figura 4.11 Grafico conocimiento sobre otras formas de reciclaje de PET

El reciclaje mecánico de residuos PET, es el que mayormente se realiza en algunas plantas en nuestro país. Sin embargo, ¿Alguna vez había escuchado sobre otra forma novedosa de reciclaje, como por el ejemplo el reciclaje químico o el reciclaje energético de envases PET?

397 respuestas



Fuente: Encuesta Virtual Reciclaje de Residuos PET en El Alto, 2022

➤ **Pregunta 10 – QUE OTRAS ALTERNATIVAS DE RECICLAJE CONOCE**

Esta pregunta estaba destinada para aquellas personas que hayan contestado con un Si la pregunta 9. Con esta pregunta se pretende ahondar un poco más en ese conocimiento que afirma tener el encuestado sobre otras alternativas de reciclaje de envases PET, permitiéndoles explicar brevemente sobre qué tipo de información poseen al respecto.

El 8.1% representa a 32 personas encuestadas de las cuales solo 28 llenaron la pregunta 10, indicando esas otras alternativas de reciclaje de PET que conocen. Desafortunadamente de las 28 personas una gran mayoría brindo información estuvo más relacionada a formas de reutilizar envases PET, el mismo reciclaje mecánico mediante elaboración de ladrillos y concreto, o aspectos de recolección de los envases, entre otros.

Figura 4.12 Algunas de las respuestas sobre alternativas de reciclaje de PET

¿Nos podría indicar brevemente que conoce sobre otras formas de reciclaje de PET?

28 respuestas

VI EN UNA REVISTA DE INVESTIGACION QUE SE PUEDEN OBTENER COMBUSTIBLES LIQUIDOS DE MATERIA PLASTICO, YO POR EJEMPLO HICE MI TESIS DE LA OBTENCION DE COMBUSTIBLES COMO DIESEL Y GASOLINA OBTENIDA DE LLANTAS PERO EN MI BUSQUEDA DE INFORMACION VI QUE SE PUEDE HACER CON BOTELLAS PET
Reutilizacion del PET
Primeramente sería fomentar el acopio y la educación ambiental en nuestro país. En otros países ya existen plantas de reciclaje, de esta forma generaríamos ganancias económicas, y podría disminuir la contaminación en nuestra ciudad.
Reciclaje de proceso químico
Para realizar ladrillos ecológicos y concreto ecológico
Solo puedo decir que conosco la hidrolisis del pet reciclado y alcoholisis que son otras formas de reciclar el pet.

Fuente: Encuesta Virtual Reciclaje de Residuos PET en El Alto, 2022

Solo 4 personas de las 28 indicaron conocer sobre el reciclaje energético, en el cual se combustiona PET para producir energía.

Otras 2 personas de las 28 indicaron conocer sobre el reciclaje químico por pirolisis de PET, en el cual se puede obtener combustibles sintéticos líquidos a partir de este residuo.

Y solo 3 personas de las 28 indicaron conocer sobre el reciclaje químico por hidrolisis o metanólisis del PET, en el cual se obtienen otros compuestos químicos de gran valor.

4.2.1.2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN OBTENIDA DE LA ENCUESTA

El objetivo de la encuesta virtual realizada tiene un carácter exploratorio de aquellos fenómenos relevantes para esta investigación, permitiendo al equipo de investigación realizar un breve análisis de la información obtenida.

Las primeras tres preguntas de la encuesta recopilaron información personal del encuestado, como *edad, sexo y distrito de la ciudad de El Alto al que pertenece*, esta información no requiere mayor análisis, es por ello que en la siguiente tabla se presenta el análisis de las respuestas para cada pregunta, a partir de la pregunta 4 hasta la pregunta 10 de la encuesta virtual.

Tabla 4.4 Análisis de respuestas obtenidas en la encuesta “Reciclaje de residuos PET en la ciudad de El Alto

PREGUNTA	ANÁLISIS DE RESULTADOS
4. Antes de la presente encuesta ¿Usted sabía reconocer cuando un envase está elaborado de plástico PET?	El 42.7% de los encuestados indico desconocer la forma de reconocer al PET, esto podría deberse a la falta de información de la codificación para reconocer a este polímero y también coincide con la falta de cultura de reciclaje en la población, el 34.8% indicó tener conocimiento para reconocer al PET, el haber alcanzado un porcentaje considerable puede deberse a que parte de los encuestados de entre 20 a 28 años eran estudiantes de la carrera de ingeniería de Gas y Petroquímica, quienes desde los primeros semestres ya conocen la importancia de los polímeros como el PET, y un 22.5% indico creer antes de la encuesta que solo las botellas desechables de refresco eran PET, también es un porcentaje considerable y esto puede deberse a que entre las pocas campañas de reciclaje que existen en el medio, se da mayor visibilidad a las botellas de gaseosas para reciclar, lo cual de alguna manera ha promovido que la población considere que solo estas botellas son de este tipo de material.
5. Ya conociendo que envases pueden ser de plástico PET ¿Con qué frecuencia diría que usa envases de este material?	En la información recopilada de esta pregunta se observa que la gran mayoría de los encuestados admiten utilizar envases PET pocas a algunas veces en su diario vivir, este resultado refleja que la población es consciente de como el material PET forma parte de sus vidas. Una menor proporción de la población encuestada escogió las opciones casi siempre y siempre, se podría interpretar que estas personas conocen con más detalle los envases que utilizan y saben que el material PET es más común de lo que uno piensa.
6. ¿Qué hace con envases PET que quedan vacíos y se convierten en residuos en su hogar? (Puede escoger más de una opción)	El 66.2% de los encuestados indica desechar este polímero con su demás basura, resultado que coincide con las respuestas de la pregunta 4. Si no se sabe reconocer correctamente un envase PET difícilmente también se lo podrá desechar de manera diferenciada para su reciclaje posterior. Además que aún hace falta que el gobierno municipal ponga a disposición políticas y procedimientos que promuevan el reciclaje de este polímero, el 42,1 % indica que vende sus residuos PET, esto se da puesto a que una mayoría de la población identifica a las botellas de gaseosa como material PET y es el que se recolecta con mayor frecuencia en el medio, y el 35.3 % de la población de estudio que prefiere reutilizar estos envases, siendo este último el paso más sencillo para alargar la vida útil de este material.

<p>7. ¿En su entorno existe consciencia sobre la importancia del reciclaje de residuos plásticos?</p>	<p>El 64.5% de los encuestados indica que no existe consciencia sobre el reciclaje en su entorno, lo cual coincide con las características de la sociedad boliviana, la cual sufre desatención para el cumplimiento de las normativas ya existentes y de adecuadas gestiones municipales que promuevan el reciclaje de residuos, el 35.5 % indica que si hay consciencia sobre el reciclaje de residuos plásticos, este porcentaje podría estar más involucrado con factores económicos que con la consciencia de reciclaje en sí, ya que el reciclaje de botellas PET es un negocio que sustenta a varias familias.</p>
<p>8. Seguro conoce que hay personas que se dedican a recolectar residuos PET. ¿Sabe usted cuál es el destino de estos envases recolectados? ¿Dónde son llevados? ¿Quiénes y a que procesos de reciclaje someterán a estos envases?</p>	<p>El 60.5 % de los encuestados indica que no conoce los procedimientos de reciclaje por los cuales pasa el PET, evidenciando que su conocimiento solo abarca hasta la fase de recolección. Esto sin duda es un gran problema para la población ya que al no conocer los procedimientos y los fines por los cuales se recolecta los envases PET en nuestro medio, el reciclaje de PET solo queda como un negocio que solo genera dinero y no consciencia, el 39.5 % de la población de estudio indica conocer sobre lo que sucede con los envases PET recolectados, esto en parte puede deberse a las pocas campañas publicitarias que algunas empresas como EMPACAR realizan, tratando de explicar a grandes rasgos los procesos de reciclaje mecánico que ellos aplican, para producir resina PET reciclada y sus aplicaciones.</p>
<p>9. El reciclaje mecánico de residuos PET, es el que mayormente se realiza en algunas plantas en nuestro país. Sin embargo, ¿Alguna vez había escuchado sobre otra forma novedosa de reciclaje, como por el ejemplo el reciclaje químico o el reciclaje energético de envases PET?</p>	<p>El 91.9% de los encuestados indica desconocer procedimientos alternativos al reciclaje mecánico para el tratamiento del PET, este resultado coincide con los resultados de la respuesta anterior, en la cual se evidencia que una mayoría no conoce tampoco en que consiste el reciclaje mecánico de PET, este amplio porcentaje puede deberse a que en nuestro medio el reciclaje químico y energético aún son poco conocidos y que por ello merecen mayor investigación, el 8.1% indico conocer los procedimientos para la despolimerización de este material, nuevamente esto podría deberse a la población estudiantil de la carrera de Ingeniería de Gas y Petroquímica que fue encuestada, quienes poseen esta información como parte de su formación profesional.</p>
<p>10. ¿Nos podría indicar brevemente que conoce sobre otras formas de reciclaje de PET?</p>	<p>Del 8.1%, el cual equivale a 32 personas, que indicaron conocer otras formas de reciclaje de PET diferente al reciclaje mecánico en la pregunta 9, solo unas 9 contestaron sobre formas de reciclaje químico o energético del PET, estas respuestas claramente provenían de estudiantes de la carrera de Ingeniería de Gas y Petroquímica, los cuales tienen mayor conocimiento sobre el tema. Sin embargo la población promedio no tiene claro los conceptos y tampoco sabe de qué tratan los diferentes tipos de reciclaje de PET disponibles. Reciclar no es lo mismo que reutilizar, y utilizar restos de PET en bloques de construcción forma parte de un reciclaje mecánico.</p>

Fuente: Elaboración Propia, 2022

4.2.1.3. CONCLUSIONES DE LA ENCUESTA VIRTUAL “RECICLAJE DE RESIDUOS PET EN LA CIUDAD DE EL ALTO”

Luego de haber realizado un análisis e interpretación de los resultados obtenidos de la encuesta virtual denominada “Reciclaje de residuos PET en El Alto” se puede concluir lo siguiente:

- Desafortunadamente no se tiene disponible para los ciudadanos de la ciudad de El Alto, información sobre la codificación internacional para facilitar el reciclaje de plásticos, sumado a eso hay varios envases de tipo PET que circulan en la ciudad y que no tienen ningún tipo de codificación lo cual dificulta aún más que el ciudadano común pueda reconocer este material y por ende pueda separarlo de manera diferenciada de sus demás residuos para que posteriormente sea reciclado.
- Los ciudadanos alteños a pesar de no saber la codificación internacional de reciclaje de plásticos, si identifica a las botellas de gaseosas como material PET y en base a ello admiten que este material forma parte regular de sus vidas, ya que una mayoría indica que lo utiliza pocas o algunas veces.
- Al solo identificar a las botellas de gaseosas como material PET, solo son estas las que con mayor frecuencia busca recolectar la población, ya que además les generan algunos ingresos mediante su venta. Sin embargo hay material PET, distinto a las típicas botellas, que son desechados junto a la basura común, debido a que se desconoce que estos también se podrían reciclar. Esto último indica la imperiosa necesidad de capacitar a las personas para reconocer los distintos tipos de plásticos para que así se reduzca la cantidad de residuos plásticos que van a parar a los rellenos sanitarios o botaderos.
- Al igual que en gran parte de Bolivia, en la ciudad de El Alto no se promueve la cultura del reciclaje, no hay gestiones adecuadas y permanentes para incrementar la consciencia sobre el reciclaje, una gran mayoría aún desconoce la importancia de esta actividad para la comunidad, además que lastimosamente el gobierno municipal al igual que varios otros en el país, no

tienen planes de gestión de residuos que fomenten el reciclaje, no solo del PET, sino de varios tipos de residuos. Se tiene una normativa vigente, pero no se cumple a cabalidad.

- El reciclaje mecánico es la forma de reciclaje más aplicada en nuestro país, sin embargo una gran mayoría de la población desconoce en qué consiste. Algunas empresas han tratado de socializar esta información, pero en la ciudad de El Alto, es algo que no ha sido suficiente. Claramente se debería procurar ampliar la difusión de esta información, no solo en empresas privadas sino también gubernamentales, y con ello concientizar más a las personas de la importancia del reciclaje.
- Si en la población común se desconoce en qué consiste el reciclaje mecánico, entonces se conocerá mucho menos sobre que es el reciclaje químico y reciclaje energético de plásticos. Estos últimos son prácticamente desconocidos por los ciudadanos de El Alto, siendo solo muy pocos que pueden citar formas diferentes de reciclaje al reciclaje mecánico de PET, siendo éstos pocos probablemente estudiantes universitarios que por su formación hayan tenido facilidad de conocer esa información.

Tras el análisis realizado en base a la encuesta virtual “Reciclaje de residuos PET en la ciudad de El Alto”, se ha visto puntos coincidentes y que apoyan los datos anteriormente recopilados, como los del censo nacional del 2012 en el cual se indica que una gran mayoría de las viviendas de la ciudad de El Alto no realiza ningún tipo de diferenciación de sus residuos al momento de desecharlos, siendo una práctica que aún se realiza en la actualidad de acuerdo a los resultados de la encuesta. De igual manera, la mayoría de los encuestados indica no utilizar demasiado los envases PET, lo cual da sentido al porcentaje de 1.05% que corresponde a los residuos PET entre todos los residuos sólidos generados en la ciudad de El Alto, porcentaje que si bien no es el más bajo, está lejos de estar entre los más altos entre otros tipos de residuos sólidos no orgánicos.

Por otra parte, gracias a esta encuesta y el análisis de los resultados, se entiende que es importante investigar otras formas de reciclaje de PET, ya que eso a su vez

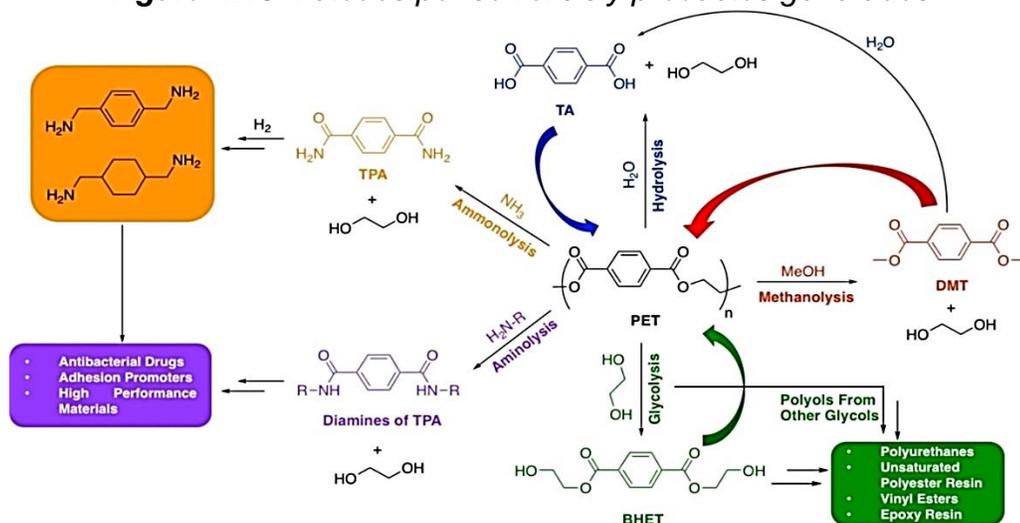
fomentaría aún más la investigación en esa área pudiendo convertirla en una opción de reciclaje de PET más reconocida. En base a lo mencionado anteriormente, es donde se apoya el presente proyecto de investigación “Obtención de ácido tereftálico por solvólisis a partir del polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto”, el cual tiene como objetivo estudiar una de las formas de reciclaje químico del PET para la obtención de un compuesto de alto valor como el ácido tereftálico y demostrar que aún hay alternativas que explorar para un reciclaje de PET de mayor eficiencia y que vaya acorde a los principios de la economía circular en beneficio de la sociedad y del medio ambiente.

4.3. SESIONES EXPERIMENTALES EN LABORATORIO

Se realizan prácticas experimentales en el laboratorio de la carrera de Ingeniería de Gas y Petroquímica, para así poder lograr el objetivo general del presente proyecto de investigación, que es obtener ácido tereftálico por solvólisis a partir de polietileno de tereftalato (PET).

Dentro de la solvólisis del PET, se encuentran la hidrólisis, glicolisis, metanolisis, aminólisis, y amonólisis. Entre todas ellas solo mediante la hidrólisis se puede obtener de manera directa al ácido tereftálico (TPA).

Figura 4.13 Métodos por solvólisis y productos generados



*TPA en esta figura corresponde a tereftalamida y TA a ácido tereftálico

Fuente: Extraído de <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cssc.202100400>

La hidrólisis implica la despolimerización de PET a ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG) mediante la adición de agua en medio ácido, alcalino o neutro. Los productos de hidrólisis pueden utilizarse para producir nuevamente resina PET virgen o pueden convertirse en materia prima para la elaboración de productos químicos de alto valor.

En el proyecto de investigación “Obtención de ácido tereftálico por solvólisis a partir de polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto”, se evalúa la obtención de este químico a partir de la hidrólisis, en sesiones experimentales en laboratorio de 5 casos específicos de envases PET, detallados a continuación:

Tabla 4.5 Tipos de envases PET a estudiar en laboratorio

CASOS A ESTUDIAR	TIPO DE RESINA	TIPO DE ENVASE
CASO 1	PET al 100% resina virgen (transparente)	Envase PET de cupcakes, masitas, atomizadores, etc.
CASO 2	PET al 100% resina reciclada (transparente)	Botella PET vital 500 ml
CASO 3	PET al 70% resina virgen y 30% reciclada (transparente)	Botella PET de coca cola, cascada transparente
CASO 4	PET al 70% resina virgen y 30% reciclada (translúcida azul o verde)	Botella PET verde o azul translúcida
CASO 5	PET de colores inusuales. (ámbar, blanco, rojo, etc.)	Botellas PET ámbar de tónico vita, inti

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Todos los casos a estudiar son de envases de polietileno de tereftalato (PET) que circulan en la ciudad de El Alto, no solo para almacenar gaseosas, sino también otro tipo de líquidos o sólidos.

Entre los casos estudio, se tiene a tres casos de envases transparentes, cada uno con composiciones diferentes de resina virgen y reciclada de PET, los cuales son los preferidos para reciclar mecánicamente, pero también se tienen dos casos de envases PET de color, los cuales suelen ser relegados en el reciclaje mecánico, por lo cual vale la pena analizar su aprovechamiento mediante reciclaje químico.

4.3.1. RECOLECCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA

Antes de llevar a cabo los distintos tipos de degradación química por hidrólisis es necesario la recolección y preparación de la materia prima para los 5 casos de envases PET a estudiar, con los que se trabajará en las sesiones experimentales.

1. Se recolectan los envases PET post consumo para cada caso a estudiar propuesto en el proyecto.
2. Posteriormente se lava muy bien los envases recolectados para quitar cualquier impureza o el restante del producto que almacenaba anteriormente.

Figura 4.14 Casos de envases PET a estudiar en laboratorio



Fuente: Elaboración Propia, 2022

3. Finalmente se trituran los envases PET de manera manual en pequeños trozos de 2mm² de área aproximadamente.

Figura 4.15 PET triturados para análisis en laboratorio



Fuente: Elaboración Propia, 2022

Utilizar muestras trituradas de envases PET de menor tamaño facilita la despolimerización.

4.3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La selección de materia prima para cada caso a estudiar, se basa en los envases PET disponibles de comercialización libre en la ciudad de El Alto, los cuales no son solo botellas de gaseosas, sino también de otro tipo de productos. A continuación se realiza la descripción de características de los envases de los casos a estudiar en las sesiones experimentales de solvolisis por hidrolisis del PET.

Tabla 4.6 Descripción de las características generales de la materia prima a utilizar en laboratorio

CASO	ENVASE UTILIZADO	CARACTERÍSTICAS ENVASE
CASO #1		<ul style="list-style-type: none"> • Producido por 100% resina virgen o nueva de PET. • Utilizado para almacenar alcohol etílico al 70% V/V. • Capacidad de envase: 1 litro • De superficie lisa y transparente • De mayor dureza y rigidez al tacto que otros envases
CASO #2		<ul style="list-style-type: none"> • Producido por 100% resina reciclada mecánicamente de PET. • Utilizado para almacenar agua de mesa • Capacidad de envase: 500 ml • De superficie lisa y transparente • De menor dureza y rigidez al tacto que los envases producidos por 100% PET resina virgen.
CASO #3		<ul style="list-style-type: none"> • Producido por 70% resina virgen o nueva de PET y 30% resina reciclada mecánicamente de PET. • Utilizado para almacenar gaseosas • Capacidad de envase: 2 litros • De superficie lisa y transparente • De dureza y rigidez similar a un envase producido por 100% PET resina virgen.

CASO #4		<ul style="list-style-type: none"> • Producido por 70% resina virgen o nueva de PET y 30% resina reciclada mecánicamente de PET. • Utilizado para almacenar gaseosas • Capacidad de envase: 330 ml • De superficie lisa y de color verde translucido (deja pasar la luz) • De dureza y rigidez similar a un envase producido por 100% PET resina virgen.
CASO #5		<ul style="list-style-type: none"> • Producido por 100% resina virgen o nueva de PET • Utilizado para almacenar medicamentos (tónico energizante) • Capacidad de envase: 500 ml • De superficie lisa y de color ámbar intenso (no deja pasar la luz) • De mayor dureza y rigidez al tacto que otros envases

Fuente: Elaboración Propia, 2022

✓ Determinación de punto de fusión

Para la determinación del punto de fusión de cada caso estudio de envases PET, se expuso al fuego al PET hasta que alcance la temperatura de punto de fusión y tomar los datos de la temperatura haciendo uso del termómetro infrarrojo, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4.7 Temperatura de punto de fusión de los casos estudio

CASO	CARACTERÍSTICAS	TEMPERATURA DE FUSION (°C)
CASO #1	100% Resina PET virgen TRANSPARENTE	250
CASO #2	100% Resina PET reciclada TRANSPARENTE	251.2
CASO #3	70% Resina PET virgen y 30% Resina reciclada - TRANSPARENTE	249.9
CASO #4	70% Resina PET virgen y 30% Resina reciclada - VERDE	250
CASO #5	100% Resina PET virgen AMBAR	255

Fuente: Elaboración Propia, 2022

El punto de fusión promedio del PET es de 260 °C, y como se observa en la tabla los valores obtenidos están cerca a dicho valor. En el caso 1, 2, 3 y 4, el punto de fusión ronda por los 250 °C, mientras que en el caso 5, la muestra de PET tiene un punto de fusión de 255 °C, lo cual indica que este caso estudio tiene una resistencia térmica mayor a los otros casos.

✓ Densidad

Una de las formas para ver el comportamiento los plásticos como el PET, es mediante la inmersión de los mismos en diferentes disolventes. En la tabla que se muestra a continuación se indica con un NO cuando el material plástico tiene una densidad mayor que el disolvente utilizado y por consecuencia no flota, caso contrario se utilizara la palabra SI para indicar que el plástico flota en el disolvente.

Tabla 4.8 Densidad de los casos estudio de PET usando distintos disolventes

CASO	CARACTERÍSTICAS	DISOLVENTES UTILIZADOS		
		ETANOL	HIDROXIDO DE SODIO AL 2M	ACIDO SULFURICO AL 98%
CASO #1	100% Resina PET virgen TRANSPARENTE	NO	NO	SI
CASO #2	100% Resina PET reciclada TRANSPARENTE	NO	NO	SI
CASO #3	70% Resina PET virgen y 30% Resina reciclada - TRANSPARENTE	NO	NO	SI
CASO #4	70% Resina PET virgen y 30% Resina reciclada - VERDE	NO	NO	SI
CASO #5	100% Resina PET virgen AMBAR	NO	NO	SI

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Para la prueba de la densidad, se utilizaron etanol, una solución de hidróxido de sodio al 2M y una solución concentrada al 98% de ácido sulfúrico, cuyas densidades son de 0.789 g/cm³, 1,09 g/cm³ y 1.84 g/cm³ respectivamente. La densidad promedio del PET es de 1.38 g/cm³. Y de alguna manera, estos datos teóricos justifican que en el caso del solvente orgánico como el etanol y en la solución de

hidróxido de sodio al 2M, las muestras de PET no flotaran, sin embargo en el caso de la solución concentrada de ácido sulfúrico al 98%, los casos 1, 2, 3 y 4 claramente el PET floto ya que eran notoriamente menos densos, pero en el caso 5 el PET no floto de manera tan clara, observando que de los 5 casos estudiados la muestra más densa pertenece al caso 5, del envase PET ámbar.

Para evaluar la solubilidad y una vez observada la flotabilidad para los diversos casos estudio ha de esperarse un tiempo para poder verificar si se produce una reacción entre el disolvente empleado y el PET respectivo del caso estudio. Las muestras de PET de cada caso estudio en etanol y la solución de hidróxido de sodio al 2M, son INSOLUBLES, mientras que en el caso del ácido sulfúrico al 98%, las muestras de PET en un lapso no mayor a 15 minutos comenzaron a degradarse a temperatura ambiente y presión atmosférica.

Tabla 4.9 Solubilidad de los casos estudio de PET usando distintos disolventes

CASO	CARACTERÍSTICAS	DISOLVENTES UTILIZADOS		
		ETANOL	HIDROXIDO DE SODIO AL 2M	ACIDO SULFURICO AL 98%
CASO #1	100% Resina PET virgen TRANSPARENTE	INSOLUBLE	INSOLUBLE	SOLUBLE
CASO #2	100% Resina PET reciclada TRANSPARENTE	INSOLUBLE	INSOLUBLE	FACILMENTE SOLUBLE
CASO #3	70% Resina PET virgen y 30% Resina reciclada - TRANSPARENTE	INSOLUBLE	INSOLUBLE	SOLUBLE
CASO #4	70% Resina PET virgen y 30% Resina reciclada - VERDE	INSOLUBLE	INSOLUBLE	SOLUBLE
CASO #5	100% Resina PET virgen AMBAR	INSOLUBLE	INSOLUBLE	DIFICILMENTE SOLUBLE

Fuente: Elaboración Propia, 2022

En el caso 2 se observó que la solubilidad se alcanzó más fácilmente que en los otros casos, al ofrecer este material menor resistencia a la degradación. Lo opuesto ocurrió en el caso 5, la muestra de PET no se degradó con la misma facilidad que las otras.

✓ **Comportamiento a la llama.**

Para evaluar el comportamiento a la llama de las muestras de PET, se procede a acercar cada muestra de envase PET de cada caso estudio, preferentemente de pequeño espesor acercándolo de manera directa a la llama. Cada muestra se calienta lentamente y se la mantiene por aproximadamente 10 segundos en la llama. Se toman los datos observados sobre: color de la llama, presencia de humos, desprendimiento de olores, facilidad de ignición, y auto extinción de la llama.

Teniendo en cuenta los parámetros indicados, se realiza la prueba de comportamiento a la llama, generando la siguiente tabla:

Tabla 4.10 Comportamiento a la llama de los casos estudiados de envases PET

PARÁMETROS	CASO #1	CASO #2	CASO #3	CASO #4	CASO #5
Arde Fácilmente	Dificultad media de incendiar	Dificultad alta de incendiar			
Color de la llama	Amarilla Anaranjada	Amarilla con centro azul	Amarilla con centro azul	Amarilla Anaranjada	Amarilla Anaranjada
Combustibilidad	Continua ardiendo tras quitar del mechero	Continua ardiendo por muy poco tiempo tras quitar del mechero			
Cantidad de Humos	Humo negro con hollín				
Tipo de Fusión	Funde y gotea	Funde y gotea	Funde y gotea	Funde y gotea	Difícil de fundir y casi no gotea
Olor	Dulzón	Dulzón	Dulzón	Dulzón	Dulzón

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Como se observa en la tabla anterior, el comportamiento a la llama de cada muestra de PET, es similar en los 5 casos. Notándose que el caso 5, nuevamente demuestra cierta resistencia a la ignición, ya que fue difícilmente de incendiar y de fundir en comparación a los otros casos.

Una vez caracterizada la materia prima a utilizar en las pruebas experimentales en laboratorio, de los 5 casos estudio de envases PET, se procede a describir de manera detallada los procedimientos seguidos para realizar el método de solvolisis

por hidrólisis neutra, alcalina y acida, métodos con los cuales se puede obtener ácido tereftálico (TPA), de manera directa.

4.3.3. HIDRÓLISIS NEUTRA – SESION LABORATORIO

La hidrólisis neutra se lleva a cabo con el uso de agua o vapor. El proceso suele funcionar a una presión de 1 a 4 MPa a temperaturas de 200 a 300 °C. La relación en peso de PET a agua es de 1:2 a 1:12. Se ha confirmado que la hidrólisis del PET procede significativamente más rápido en estado fundido que en estado sólido; por lo tanto, es ventajoso llevar a cabo el reciclaje utilizando este método a temperaturas superiores a 245 °C. (Morales Palomino, 2010)

Una ventaja indudable de la hidrólisis neutra es su alta pureza ecológica, por lo que cabe esperar un creciente interés por esta tecnología. Su inconveniente es que todas las impurezas mecánicas presentes en el polímero quedan en el TPA; así, el producto tiene una pureza considerablemente peor que el producto de hidrólisis ácida o alcalina. (Lopez Barajas, 2014)

Objetivo de la sesión de laboratorio de Hidrolisis Neutra:

- Obtener ácido tereftálico por hidrólisis neutra de 5 casos de envases post consumo de polietileno de tereftalato (PET).

Materiales:

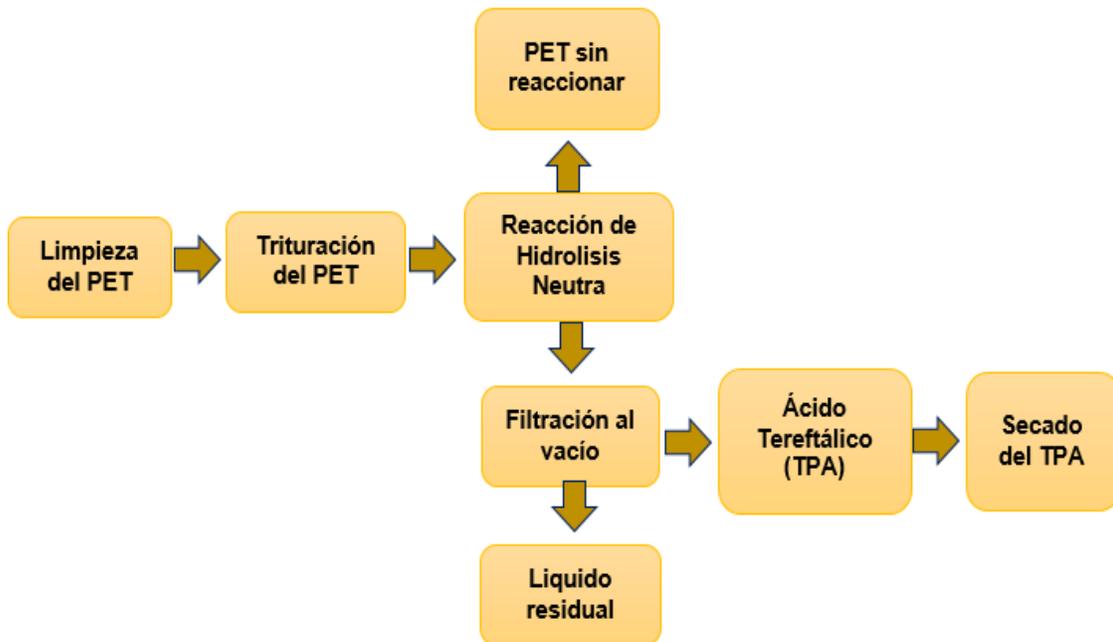
- 5g de PET triturado de cada caso a estudiar
- 60ml de agua destilada
- Balanza analítica
- Vidrio reloj
- Kit de destilación simple
- Manto calefactor
- Termómetro
- Beaker (vaso precipitado)
- Varilla de Vidrio

- Embudo de vidrio
- Matraz Erlenmeyer
- Papel filtro
- Espátula

4.3.3.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL HIDROLISIS NEUTRA

A continuación se muestra un diagrama de bloques que representa los pasos a seguir para el desarrollo de las sesiones experimentales de hidrolisis neutra del PET.

Figura 4.16 Diagrama de bloques – Hidrolisis Neutra



Fuente: Elaboración Propia a partir de información recopilada, 2022

1. Se desinfecta las partes que componen los kits de destilación simple a ser utilizados para la práctica.
2. Se pesan 5g de cada caso de envases PET a estudiar en la balanza analítica
3. Se prepara el volumen de 60ml de agua destilada para cada caso a estudiar.
4. Se arman los kits disponibles de destilación simple.

Figura 4.17 Armado de Kit de destilación simple en laboratorio IGP



Fuente: Elaboración Propia, 2022

5. Mezclar en un vaso precipitado limpio los 5g de PET a estudiar junto a los 60ml de agua destilada.
6. Posteriormente se trasvasa la mezcla de PET/agua destilada al balón de destilación

Proceso de Hidrolisis Neutra

7. Se inicia el proceso en el equipo de destilación simple, calentando la mezcla PET/agua subiendo la temperatura del manto calefactor gradualmente en un tiempo estimado de residencia de 1 hora.
8. Mientras se sube la temperatura se observa que el punto de ebullición de la mezcla es de 87 C y a ese tiempo las escamas de PET triturado se tornan poco a poco blanquecinas en el caso de los envases transparentes, mientras que los envases de color mantienen su coloración por mucho más tiempo.
9. Se continúa con el proceso de degradación del PET pasando la hora de iniciado el proceso, con la intención de obtener más ácido tereftálico (siendo en total 3 o 4 horas de iniciado el proceso). Dicha etapa se complica, debido

a las dificultades que se tuvieron para mantener la temperatura por encima de los 200 C.

10. Luego de tratar de completar la degradación, se quita la solución de la fuente de calor y se espera a que disminuya la temperatura hasta que llegue a temperatura ambiente.

Figura 4.18 Proceso de Hidrolisis Neutra en laboratorio IGP



Fuente: Elaboración Propia, 2022

Separación del producto obtenido (TPA)

11. Se trasvasa la muestra fría post-hidrolisis a un vaso precipitado y se espera a que el compuesto se precipite para luego también separar los residuos de PET que no hayan sido degradados.
12. Se pesa los restos de PET que no hayan sido degradados y también se mide el volumen de la solución obtenida ya sin restos de PET sin reaccionar
13. Se filtra cada una de las soluciones obtenidas con papel filtro y un embudo de vidrio, en un tiempo aproximado de una hora cada muestra.

14. Tras el filtrado, se deben secar los papeles filtro, que tienen ácido tereftálico, a temperatura ambiente, el tiempo de secado de cada muestra puede tomar 1 hora aproximadamente.
15. Una vez seco, se pesa el ácido tereftálico contenido en el papel filtro en la balanza analítica.

Figura 4.19 Acido Tereftálico obtenido por Hidrolisis Neutra



Fuente: Elaboración Propia, 2022

4.3.3.2. CALCULOS RENDIMIENTO DE LA REACCION DE HIDRÓLISIS NEUTRA DE PET

Se calcula el rendimiento con la siguiente ecuación:

Ecuación 4.2 Ecuación para el cálculo de rendimiento

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Moles producto real obtenido}}{\text{Moles producto teorico}} * 100$$

Lo cual para el caso del presente proyecto también se puede interpretar de la siguiente forma:

Ecuación 4.3 Rendimiento de la reacción del reciclaje químico de PET

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Moles de Acido Tereftálico}}{\text{Moles de PET}} * 100$$

Sabiendo que:

Ecuación 4.4 Ecuación para cálculo de moles de ácido tereftálico

$$\text{Moles de Acido Tereftálico} = \frac{\text{Masa de Acido Tereftálico (g)}}{\text{Peso molecular de Acido Tereftálico (g/mol)}}$$

Y de igual forma:

Ecuación 4.5 Ecuación para cálculo de moles de PET

$$\text{Moles de PET} = \frac{\text{Masa de PET (g)}}{\text{Peso molecular de PET (g/mol)}}$$

Entonces las ecuaciones 4.3 y 4.4 en la ecuación 4.2 se representan de la siguiente forma en una sola ecuación:

Ecuación 4.6 Ecuación general para cálculo de rendimiento de reacción

$$\text{Rendimiento}(\%) = \frac{\frac{\text{Masa de Acido Tereftálico (g)}}{\text{Peso molecular de Acido Tereftálico (g/mol)}}}{\frac{\text{Masa de PET (g)}}{\text{Peso molecular de PET (g/mol)}}} * 100$$

En el cálculo de rendimiento para cada uno de los casos evaluados, se va a considerar al peso molecular del ácido tereftálico como 166,13 g/mol y el peso molecular del tereftalato de polietileno (PET) como 192 g/mol, siendo este último el valor más utilizado para los cálculos experimentales, ya que representa a la masa molecular de la unidad repetitiva de PET.

A continuación se procede a realizar el cálculo de los rendimientos obtenidos por la hidrólisis neutra de cada caso estudio del presente proyecto de investigación.

➤ **CASO 1.** PET 100% RESINA VIRGEN - TRANSPARENTE**Tabla 4.11** Cantidad de reactivos y productos para el Caso 1

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	5.0153 gramos
Agua Destilada	60 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.4978 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Calculo del rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 1}} = \frac{\frac{0.4978 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{5.0153 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 11.48\%$$

CASO 2. PET 100% RESINA RECICLADA – TRANSPARENTE

Tabla 4.12 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 2

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	5.0955 gramos
Agua Destilada	60 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.5207 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 2}} = \frac{\frac{0.7207 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{5.0955 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 16.36\%$$

- **CASO 3.** PET VIRGEN al 70% y PET RECICLADO AL 30%
TRANSPARENTE

Tabla 4.13 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 3

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	5.1292 gramos
Agua Destilada	60 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.5921 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 3}} = \frac{\frac{0.5921 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{5.1292 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 13.35\%$$

➤ **CASO 4.** PET 70% RESINA VIRGEN y 30% RESINA RECICLADA – VERDE

Tabla 4.14 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 4

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	5.0029 gramos
Agua Destilada	60 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.5537gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$Rendimiento(\%)_{CASO\ 4} = \frac{\frac{0.5537\ g}{166.13\ g/mol}}{\frac{5.0029\ g}{192.2\ g/mol}} * 100 = 12.80\%$$

➤ **CASO 5.** PET 100% RESINA VIRGEN – AMBAR

Tabla 4.15 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 5

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	5.1136 gramos
Agua Destilada	60 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.3547 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Calculo del rendimiento según la ecuación 4.6

$$Rendimiento(\%)_{CASO\ 5} = \frac{\frac{0.3547\ g}{166.13\ g/mol}}{\frac{5.1136\ g}{192.2\ g/mol}} * 100 = 8.02\%$$

Recopilando los rendimientos obtenidos en cada uno de los casos estudiados, se tiene la siguiente tabla:

Tabla 4.16 Casos de reciclaje químico y sus respectivos rendimientos por hidrólisis neutra (%)

# CASO	ENVASE PET	RENDIMIENTO
CASO #1	TRANSPARENTE 100% Resina Virgen	11.48%
CASO #2	TRANSPARENTE 100% Resina Reciclada	16.36%
CASO #3	TRANSPARENTE 70% Resina Virgen y 30% Resina Reciclada	13.35%
CASO#4	VERDE 70% Resina Virgen y 30% Resina Reciclada	12.80%
CASO#5	AMBAR 100% Resina Virgen	8.02%

Fuente: Elaboración Propia, 2022

4.3.3.3. DISCUSIÓN DE LA PRÁCTICA DE HIDROLISIS NEUTRA

Los rendimientos obtenidos por el método de solvólisis por Hidrólisis Neutra resultan ser bastante bajos, no pudiendo recuperar con mayor éxito el ácido tereftálico. El mejor rendimiento corresponde al caso 2, en el cual se evaluó a un envase PET 100% reciclado, el cual ofrece menos resistencia en el momento de degradación a altas temperaturas. Y entre los rendimientos más bajos de recuperación de ácido tereftálico se tienen al caso 1 y caso 5. Ambos casos tienen en común estar compuestos por 100% resina PET virgen, lo cual al contrario del caso 2, representa mayor resistencia a la degradación, siendo el caso 5 con el rendimiento más bajo debido a que además de lo anteriormente mencionado, es un envase PET que tiene una mayor carga de colorantes, explicando de esta manera los bajos porcentajes obtenidos. Sin duda, uno de los más grandes problemas que se tuvo durante la práctica experimental fue el control de la temperatura. Teniendo mucha complicación para llegar a temperaturas superiores a los 200 C, debido a las fugas existentes en el equipo de destilación, también siendo esta una de las razones por las cuales no se pudo completar la degradación del PET y así poder recuperar más ácido tereftálico. Otro aspecto que también se debe mencionar, es la presencia de impurezas en el ácido tereftálico obtenido, ya que en los casos 4 y 5 de botellas de

color, la coloración del ácido tereftálico no es el típico tono blanquecino, sino que de alguna manera los colorantes de los envases se mantienen, tal como se observa en la figura 4.19.

4.3.3.4. CONCLUSIONES DE LA PRACTICA DE HIDROLISIS NEUTRA DEL PET

- Se evaluó el reciclaje químico de residuos post consumo de polietileno de tereftalato (PET) mediante hidrolisis neutra para obtener ácido tereftálico (TPA) de 5 casos estudio. Se observó que los rendimientos obtenidos en todos los casos son bastante bajos, oscilando entre el 8% y el 16%, siendo el mayor rendimiento del caso 2, un envase PET 100% resina reciclada, debido a que esta al ser una resina reciclada mecánicamente, posee una baja resistencia térmica, lo cual facilitó la degradación, y de manera opuesta entre los menores rendimientos están aquellos casos de resina PET 100% resina virgen. Los casos en los que se mezclan la resina virgen con la reciclada, ofrecen rendimientos intermedios y parecidos entre ellos.
- Se tuvo complicaciones con alcanzar las temperaturas deseadas (mayores a 200 C), no pudiendo fomentar aún más la formación de ácido tereftálico. Además, en los casos que evalúan los envases de color, el ácido tereftálico obtenido no es blanquecino, denotando la presencia de impurezas, lo cual ratifica lo teórico visto anteriormente sobre las desventajas de este método.
- La hipótesis de investigación aplicando este método de solvólisis no se ve corroborada, ya que con la hidrolisis neutra se obtuvieron rendimientos de recuperación de ácido tereftálico mucho menores al 51% en los 5 casos estudiados, además de que se observan en algunos casos la presencia de impurezas (coloración) en el producto obtenido.

4.3.4. HIDROLISIS BASICA – SESION LABORATORIO

Un estudio desarrollado el 2011, denominado “Alkaline Hydrolysis of Polyethylene Terephthalate at Lower Reaction Temperature” de la Universidad de Doshisha Japón, propone una hidrólisis alcalina que involucra el uso de NaOH (hidróxido de

sodio) y C_2H_5OH (etanol). Este proceso es llevado a cabo con el uso de una solución acuosa de hidróxido de sodio, con una concentración del 2 al 20% diluida en etanol, a una temperatura entre 100 y 110°C. La reacción procede lentamente, inclusive puede tomar entre 3 y 6 horas, dependiendo de la temperatura, presión y cantidad de reactivos utilizados.

La gestión 2021, uno de los proyectos del Instituto de Investigaciones de la carrera de Ingeniería de Gas y Petroquímica de la Universidad Pública de El Alto titulado: “Sistema de reciclaje a partir de residuos post consumo de tereftalato de polietileno en la zona de Villa Ingenio”, exploro uno de los métodos para realizar hidrolisis básica, utilizando solo agua como solvente. Es por ello que para el presente estudio de este método, se realiza la comparación de la hidrolisis básica utilizando agua como solvente con esta otra forma de hidrolisis básica con etanol como solvente basado en el estudio de la Universidad de Doshisha de Japón indicado en el anterior párrafo.

Objetivo de la sesión de laboratorio de Hidrolisis Básica

- Obtener ácido tereftálico por hidrolisis básica de 5 casos de envases post consumo de polietileno de tereftalato (PET) utilizando tanto agua como etanol como solventes.

Materiales:

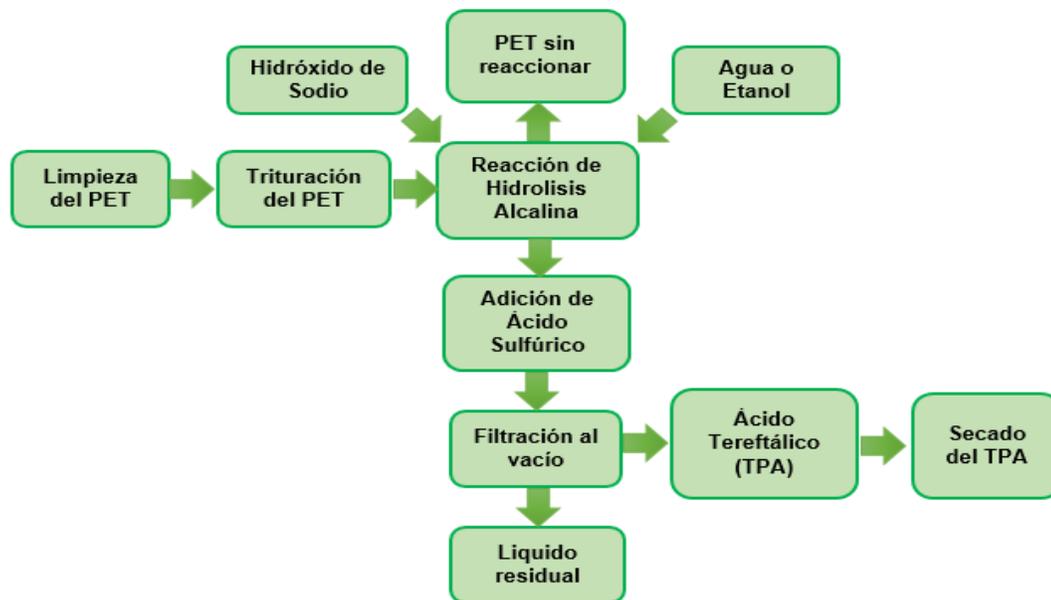
- PET triturado de cada caso a estudiar
- Agua destilada
- Etanol
- NaOH (Hidroxido de sodio)
- Ácido clorhídrico/ácido sulfúrico
- Balanza analítica
- Plancha de calentamiento con agitación
- Vidrio reloj
- Termómetro

- Beaker (vaso precipitado)
- Varilla de Vidrio
- Embudo de vidrio
- Matraz Erlenmeyer
- Papel filtro
- Espátula

4.3.4.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL HIDROLISIS BASICA

A continuación se muestra un diagrama de bloques que representa los pasos a seguir para el desarrollo de las sesiones experimentales de hidrolisis alcalina del PET.

Figura 4.20 Diagrama de bloques – Hidrolisis Alcalina



Fuente: Elaboración Propia a partir de información recopilada, 2022

➤ **HIDRÓLISIS BASICA UTILIZANDO AGUA COMO SOLVENTE**

1. Se prepara una solución de NaOH y agua, para ello se debe disolver 2 gramos de NaOH en 40 ml de agua destilada.
2. Ya teniendo los envases PET triturados, se pesan 2 g de PET triturado de cada caso a estudiar en la balanza analítica.

Figura 4.21 Reactivos a utilizar para la hidrolisis alcalina de PET con Agua



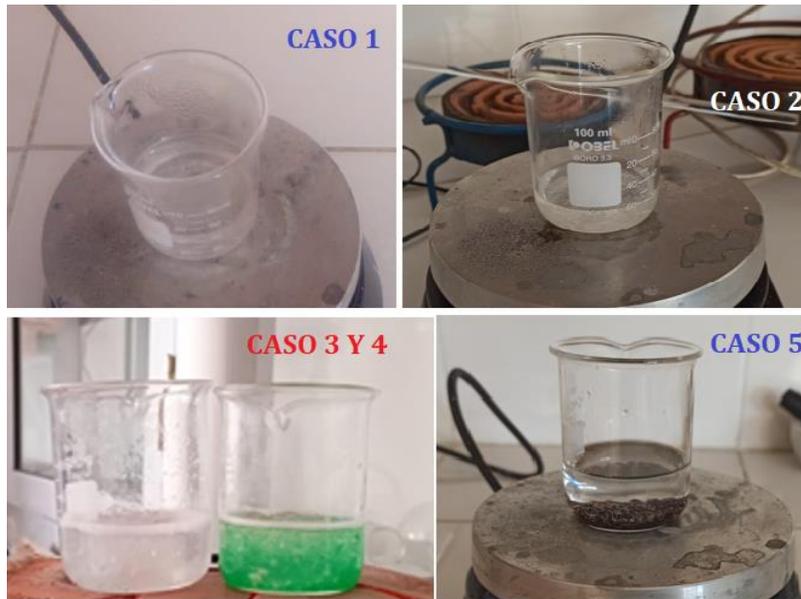
Fuente: Elaboración Propia, 2022

3. Luego se mezcla en un vaso precipitado limpio los 2 g de PET del caso a estudiar y la solución previamente preparada de NaOH/Agua, con ayuda de una varilla de vidrio.

Proceso Hidrolisis Alcalina con Agua

4. Se coloca el vaso precipitado sobre la plancha de calentamiento con agitación para calentar la muestra progresivamente.
5. La temperatura empieza a subir gradualmente hasta llegar a 87°C, punto de ebullición del agua, y a esta temperatura promedio, la solución comienza a evaporarse. Dicho proceso de degradación toma al menos 2 horas.
6. Se observan que durante la degradación, los trozos de PET triturados cambian ligeramente de coloración a tornarse más blanquecinos, en los casos 1, 2, 3, o y disminuyen ligeramente su tamaño, en cambio en los casos 4 y 5 se observa que la solución toma el color del PET siendo degradado.
7. La degradación se completa pasando las 2 horas, obteniendo una masa seca con algunos residuos de PET que no han reaccionado, esta masa es de color blanca en los casos 1, 2, 3 y en los casos 4 y 5 se observa una masa con el color del PET degradado.

Figura 4.22 Degradación de PET sobre la plancha de calentamiento



Fuente: Elaboración Propia, 2022

Figura 4.23 Tereftalato de sodio obtenido por la degradación por hidrolisis alcalina



Fuente: Elaboración Propia, 2022

Separación del producto obtenido (TPA).

8. A dicha masa obtenida con residuos PET, se le añade 20 - 30 ml de agua destilada para disolver el tereftalato de sodio formado y los sólidos de PET que no reaccionaron se separan por filtración al vacío.
9. Luego de separar los residuos de PET que no hayan reaccionado de la muestra obtenida se los seca para su posterior pesaje.

Figura 4.24 Separación del PET que no ha reaccionado

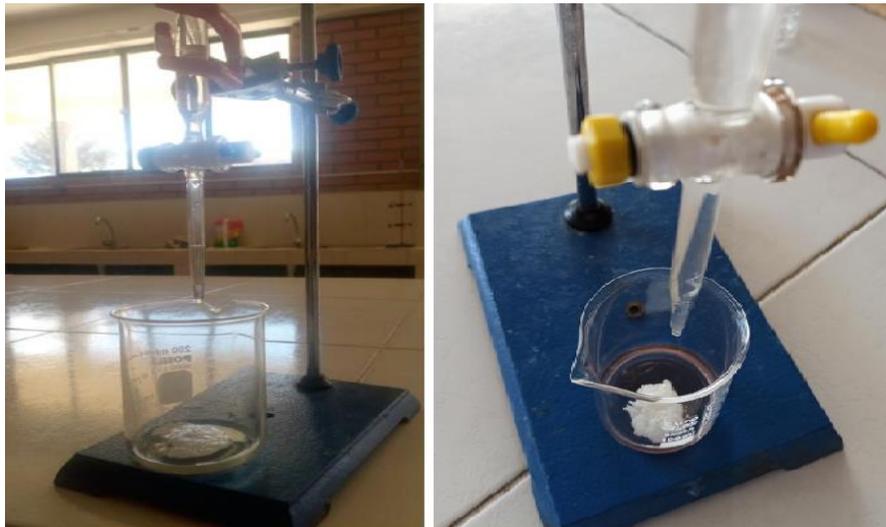


Fuente: Elaboración Propia, 2022

Neutralización de la mezcla

10. Con una solución de H_2SO_4 al 2M, Véase Anexo 1, se neutraliza la fase líquida de la muestra obtenida, viendo la formación de un precipitado blanquecino, que en teoría es el ácido tereftálico, que luego forma una solución lechosa.

Figura 4.25 Formación del ácido tereftálico por adición de ácido sulfúrico



Fuente: Elaboración Propia, 2022

11. Se filtra cada una de las soluciones lechosas obtenidas con papel filtro en un embudo en un tiempo aproximado de 2 horas cada muestra.

Figura 4.26 Neutralización de la solución ácida y posterior filtración



Fuente: Elaboración Propia, 2022

12. El filtrado se deja secar a temperatura ambiente al menos durante 24 horas para que el ácido tereftálico obtenido seque completamente sobre el papel filtro.
13. Una vez seco, se extrae el ácido tereftálico presente en el papel filtro con ayuda de una espátula metálica y vidrios de reloj.
14. Finalmente se pesa el ácido tereftálico obtenido en la balanza analítica.

Figura 4.27 Ácido tereftálico obtenido por hidrólisis básica con Agua



Fuente: Elaboración Propia, 2022

➤ **HIDROLISIS BÁSICA UTILIZANDO ETANOL COMO SOLVENTE**

1. Se prepara una solución de NaOH y etanol, para ello se debe disolver 0.5 gramos de NaOH en 7 ml de etanol.

- Ya teniendo los envases PET triturados, se pesan 1 g de PET triturado de cada caso a estudiar en la balanza analítica.

Figura 4.28 Reactivos a utilizar para la hidrólisis básica del PET con etanol



Fuente: Elaboración Propia, 2022

- Luego se mezcla en un vaso precipitado limpio el 1 g de PET del caso a estudiar y la solución previamente preparada de NaOH/Etanol, con ayuda de una varilla de vidrio.

Proceso Hidrólisis Alcalina con Etanol

- Se coloca el vaso precipitado sobre la plancha de calentamiento con agitación para calentar la muestra progresivamente.
- La temperatura empieza a subir gradualmente hasta llegar a 78°C, punto de ebullición del etanol, y a esta temperatura promedio, la solución comienza a evaporarse. Dicho proceso de degradación toma entre 20 a 30 minutos aproximadamente.
- Se observan que durante la degradación, los trozos de PET triturados cambian ligeramente de coloración a tornarse más blanquecinos, en los casos 1, 2, 3, o y disminuyen ligeramente su tamaño, en cambio en los casos 4 y 5 se observa que la solución toma el color del PET siendo degradado, de manera similar a cuando se utilizó el agua como solvente.

Figura 4.29 Degradación del PET con una solución de NaOH y Etanol



Fuente: Elaboración Propia, 2022

7. La degradación se completa pasando los 20 o 30 minutos, obteniendo una masa seca que es el tereftalato de sodio con algunos residuos de PET que no han reaccionado, esta masa es de color blanca en los casos 1, 2, 3 y en los casos 4 y 5 se observa una masa con el color del PET degradado.

Separación del producto obtenido (TPA).

8. A dicha masa obtenida con residuos PET, se le añade 20 ml de agua destilada para disolver el tereftalato de sodio formado y los sólidos de PET que no reaccionaron se separan por filtración al vacío.

Figura 4.30 PET no reaccionado filtrado, del caso 5, botella Ámbar



Fuente: Elaboración Propia, 2022

9. Luego de separar los residuos de PET que no hayan reaccionado de la muestra obtenida se los seca para su posterior pesaje.

Neutralización de la mezcla

10. Con una solución de H_2SO_4 al 2M se neutraliza la fase líquida de la muestra obtenida, viendo la formación de un precipitado blanquecino, que es el ácido tereftálico, para luego formar una solución lechosa.
11. Se filtra cada una de las soluciones lechosas obtenidas con papel filtro en un embudo en un tiempo aproximado de 2 horas cada muestra.

Figura 4.31 Neutralización de la solución de ácido sulfúrico y posterior filtración



Fuente: Elaboración Propia, 2022

12. El filtrado se deja secar a temperatura ambiente al menos durante 24 horas para que el ácido tereftálico obtenido seque completamente sobre el papel filtro.

Figura 4.32 Acido Tereftálico seco en los papeles filtro



Fuente: Elaboración Propia, 2022

13. Una vez seco, se extrae el ácido tereftálico presente en el papel filtro con ayuda de una espátula metálica y vidrios de reloj.
14. Finalmente se pesa el ácido tereftálico obtenido en la balanza analítica, de igual manera que en la hidrólisis alcalina con agua como solvente.

4.3.4.2. CALCULOS RENDIMIENTO DE LA REACCION DE HIDRÓLISIS BASICA DE PET

Se realizan los cálculos necesarios para hallar los rendimientos obtenidos en cada caso de estudio mediante la hidrólisis alcalina utilizando solo agua como solvente y también utilizando etanol como solvente.

➤ RENDIMIENTOS HIDROLISIS BASICA UTILIZANDO AGUA COMO SOLVENTE

A continuación se procede a realizar el cálculo de los rendimientos obtenidos por la hidrólisis alcalina con agua como solvente de cada caso estudio del presente proyecto de investigación.

➤ CASO 1. PET 100% RESINA VIRGEN – TRANSPARENTE

Tabla 4.17 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 1

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	2.0026 gramos
Hidróxido de sodio	2.0099 gramos
Agua destilada	40 mL
Ácido sulfúrico al 2M	8 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.6981 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$Rendimiento(\%)_{CASO 1} = \frac{\frac{0.6981 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{2.0026 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 40.33\%$$

➤ **CASO 2. PET 100% RESINA RECICLADA – TRANSPARENTE**

Tabla 4.18 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 2

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	2.0452 gramos
Hidróxido de sodio	2.0043 gramos
Agua destilada	40 mL
Ácido sulfúrico al 2M	6 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.8115 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 2}} = \frac{\frac{0.8115 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{2.0452 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 45.90\%$$

➤ **CASO 3. PET VIRGEN al 70% y PET RECICLADO AL 30% TRANSPARENTE**

Tabla 4.19 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 3

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	2.0301 gramos
Hidróxido de sodio	2.0019 gramos
Agua destilada	40 mL
Ácido sulfúrico al 2M	7 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.7254 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 3}} = \frac{\frac{0.7254 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{2.0301 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 41.34\%$$

➤ **CASO 4. PET 70% RESINA VIRGEN y 30% RESINA RECICLADA - VERDE**

Tabla 4.20 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 4

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	2.0107 gramos
Hidróxido de sodio	2.0012 gramos
Agua destilada	40 mL
Ácido sulfúrico al 2M	6 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.7166 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 4}} = \frac{\frac{0.7166 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{2.0107 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 41.23\%$$

➤ **CASO 5. PET 100% RESINA VIRGEN - AMBAR**

Tabla 4.21 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 5

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	2.0078 gramos
Hidróxido de sodio	2.0079 gramos
Agua destilada	40 mL
Ácido sulfúrico al 2M	6 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.5771 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 5}} = \frac{\frac{0.5771 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{2.0078 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 33.25\%$$

➤ **RENDIMIENTOS HIDROLISIS BÁSICA UTILIZANDO ETANOL COMO SOLVENTE**

A continuación se procede a realizar el cálculo de los rendimientos obtenidos por la hidrolisis alcalina con etanol como solvente de cada caso estudio del presente proyecto de investigación.

➤ **CASO 1. PET 100% RESINA VIRGEN - TRANSPARENTE**

Tabla 4.22 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 1

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	1.0070 gramos
Hidróxido de sodio	0.5679 gramos
Etanol	7 mL
Ácido sulfúrico al 2M	5 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.5059 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Calculo del rendimiento según la ecuación 4.6

$$Rendimiento(\%)_{CASO\ 1} = \frac{\frac{0.5059\ g}{166.13\ g/mol}}{\frac{1.0070\ g}{192.2\ g/mol}} * 100 = 58.12\%$$

➤ **CASO 2. PET 100% RESINA RECICLADA - TRANSPARENTE**

Tabla 4.23 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 2

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	1.0079 gramos
Hidróxido de sodio	0.5012 gramos
Etanol	7 mL
Ácido sulfúrico al 2M	4 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.7575 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 2}} = \frac{\frac{0.7575 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{1.0079 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 86.95\%$$

- **CASO 3.** PET VIRGEN al 70% y PET RECICLADO AL 30% TRANSPARENTES

Tabla 4.24 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 3

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	1.0059 gramos
Hidróxido de sodio	0.5012 gramos
Etanol	7 mL
Ácido sulfúrico al 2M	6 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.5328 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 3}} = \frac{\frac{0.5328 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{1.0059 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 61.28\%$$

- **CASO 4.** PET 70% RESINA VIRGEN y 30% RESINA RECICLADA - VERDE

Tabla 4.25 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 4

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	0.9885 gramos
Hidróxido de sodio	0.4805 gramos
Etanol	7 mL
Ácido sulfúrico al 2M	5.5 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.4834 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 4}} = \frac{\frac{0.4834 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{0.9885 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 56.57\%$$

➤ **CASO 5. PET 100% RESINA VIRGEN - AMBAR**

Tabla 4.26 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 5

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	1.0032 gramos
Hidróxido de sodio	0.5176 gramos
Etanol	7 mL
Ácido sulfúrico al 2M	3 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.3937 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Calculo del rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 5}} = \frac{\frac{0.3937 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{1.0032 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 45.40\%$$

Tabla 4.27 Casos de reciclaje químico y sus respectivos rendimientos por hidrólisis alcalina con agua y con etanol (%)

# CASO	ENVASE PET	RENDIMIENTO CON AGUA	RENDIMIENTO CON ETANOL
CASO #1	TRANSPARENTE 100% Resina Virgen	40.33%	58.12%
CASO #2	TRANSPARENTE 100% Resina Reciclada	45.90%	86.95%
CASO #3	TRANSPARENTE 70% Resina Virgen y 30% Resina Reciclada	41.34%	61.28%
CASO#4	VERDE 70% Resina Virgen y 30% Resina Reciclada	41.23%	56.57%
CASO#5	AMBAR 100% Resina Virgen	33.25%	45.40%

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Recopilando los rendimientos obtenidos en cada uno de los casos estudiados, tanto en la hidrólisis alcalina con agua como con etanol como solvente, se tiene la tabla anterior.

4.3.4.3. DISCUSIÓN DE LA PRÁCTICA DE HIDROLISIS ALCALINA

De todos los casos evaluados, tanto por hidrólisis alcalina con agua, así como con etanol, se observa que hay una notoria diferencia entre los rendimientos obtenidos para ambas solventes. Sin embargo, a pesar de estas diferencias, los rendimientos comparten las mismas tendencias, por ejemplo en el caso #2 se tiene el rendimiento más elevado en la hidrólisis alcalina con agua, y a la misma vez, este caso también tiene el mayor rendimiento en la hidrólisis alcalina con etanol. De manera similar ocurre con el caso #5, el cual presenta los menores rendimientos en ambas situaciones.

Con el método de hidrólisis alcalina utilizando solo agua como solvente, se observan en todos los casos, rendimientos menores al 51%. Lo que demostraría que se necesita mayor tiempo de reacción, además se debe indicar que los residuos PET triturados y evaluados en cada caso pudieron haber sido de menor tamaño para facilitar aún más la degradación, esto último también habría afectado al rendimiento de la reacción.

Con el método de hidrólisis alcalina con etanol como solvente, se obtienen rendimientos mayores al 51% en 4 de los 5 casos evaluados, evidenciando que el etanol como solvente acelera la degradación del PET permitiendo recuperar mayor cantidad de ácido tereftálico.

En los tres primeros casos se evalúan a envases transparentes de PET, sin embargo se obtienen diversos rendimientos en cada uno de ellos. A continuación se evalúa cada uno de estos casos.

El primer caso estudia a un envase PET 100% virgen, el cual obtiene un rendimiento del 40.33% con la hidrólisis alcalina con agua y 58.12% con la hidrólisis alcalina con etanol. Dichos rendimientos están entre los más bajos obtenidos en ambas

situaciones, esto puede deberse a que como se trata de envases PET de resina virgen, estos poseen mayor resistencia térmica y por ende la degradación se hace más difícil.

En el segundo caso, se estudia a un envase PET 100% resina reciclada, en este caso como se mencionó anteriormente, se obtuvieron los mayores rendimientos, el 45.90% en la hidrolisis alcalina con agua y 86.95% en la hidrolisis alcalina con etanol. De forma contraria al primer caso, este tipo de envases no suelen ser igual de resistentes que los envases de resina PET 100% virgen, y esta característica es la que habría permitido que la degradación se de en mayor proporción.

En el tercer caso, se estudia a un envase PET 70% resina virgen y 30% resina reciclada, el cual obtuvo un rendimiento de 41.34% con hidrolisis alcalina con agua y 61.28% con la hidrolisis alcalina con etanol. Este caso fue como el punto medio de los dos casos anteriores, al ser producto de la mezcla de resina virgen con reciclada. Este tipo de envases al estar elaborado con mayor porcentaje de resina virgen, también habría presentado cierta resistencia al momento de degradación, pero no tanta como el envase que está hecho de 100% resina PET virgen.

El caso 4 y 5, se trata de envases PET de color, una verde translúcida y otra de color ambar oscuro, ambos envases circulan en el medio y suelen ser relegados o incluso rechazados por empresas que realizan reciclaje mecánico de PET. Es por ello que también es necesario evaluar este tipo de casos.

En el cuarto caso, se estudia un envase PET 70% resina virgen y 30% resina reciclada de color verde translucido. Los rendimientos obtenidos en este caso fueron de 41.23% en la hidrolisis alcalina con agua y de 56.57% en la hidrolisis alcalina con etanol. En este caso se observa que la recuperación de ácido tereftálico es muy similar al caso 3, además cabe resaltar que el ácido tereftálico obtenido tiene las mismas características físicas que el recuperado en el caso 3, obteniendo un ácido tereftálico blanquecino, debido a que el color verde se fue perdiendo durante la degradación y filtrado. Demostrando así que se puede obtener aprovechar este tipo

de envase de igual forma que un envase transparente mediante reciclaje químico por hidrolisis alcalina.

Finalmente en el quinto caso, se estudia a un envase PET 100% virgen de color ámbar oscuro. En este caso se obtuvieron los rendimientos de 33.25% en la hidrolisis alcalina con agua y de 45.40% en la hidrolisis alcalina con etanol. Este caso obtuvo los rendimientos más bajos, lo cual puede deberse a su alto contenido de colorante en el envase, sumado a esto, se trata de una resina virgen al 100%, por lo cual también ofrece cierta resistencia al momento de la degradación como en el primer caso. El ácido tereftálico obtenido en este caso no es del color blanco, sino que presenta una coloración verdosa ligera, el color no ha podido ser retirado por completo como en el caso 4 durante el proceso, y esto evidencia que se necesitaría de otros procesos más complejos de purificación.

4.3.4.4. CONCLUSIONES DE LA PRACTICA DE HIDROLISIS ALCALINA DEL PET

- Se evaluó el reciclaje químico de residuos post consumo de polietileno de tereftalato (PET) mediante hidrolisis alcalina, utilizando dos tipos de solventes, agua y etanol, para obtener ácido tereftálico (TPA) de 5 casos estudio.
- Se realizaron prácticas experimentales en laboratorio aplicando el reciclaje químico por hidrolisis alcalina de PET utilizando dos tipos de solventes como el agua y el etanol para la obtención de ácido tereftálico. Se evaluaron 5 casos de estudio, cada uno con características diferentes y que circulan en nuestro país, haciendo uso de reactivos accesibles que nos permitieron evaluar la eficiencia de cada método.
- Se calculó el rendimiento de la recuperación de ácido tereftálico en cada uno de los diferentes casos estudiados. Se observó que el mayor rendimiento obtenido proviene de un envase PET 100% resina reciclada, debido a que esta al ser una resina reciclada mecánicamente, posee una baja resistencia térmica, lo cual facilitó la degradación, y de manera opuesta entre los

menores rendimientos están aquellos casos de resina PET 100% resina virgen. Los casos en los que se mezclan la resina virgen con la reciclada, ofrecen rendimientos intermedios y parecidos entre ellos.

- Se concluye que el etanol es mejor solvente que el agua en la hidrólisis alcalina del PET, esto debido a que los mayores rendimientos de ácido tereftálico se obtuvieron utilizando al etanol como solvente, además que el tiempo de degradación necesario es más corto en comparación con el método solo con agua.
- La hipótesis de investigación se ve corroborada en el caso de utilizar la hidrólisis alcalina con etanol como solvente, ya que con este método se obtuvieron rendimientos de recuperación de ácido tereftálico superiores al 51% en 4 de los 5 casos estudiados.

4.3.5. HIDROLISIS ÁCIDA – SESION LABORATORIO

Para la hidrólisis ácida se pueden emplear varias sustancias ácidas en el proceso incluido el ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) (que es más comúnmente utilizado), ácido nítrico (HNO_3) y ácido fosfórico (H_3PO_4). El uso de ácido sulfúrico concentrado puede ayudar a reducir el consumo de energía del proceso mediante la reducción del requisito de alta presión y temperatura en el recipiente de reacción. El ácido tereftálico (TPA) se puede recuperar del polietileno de tereftalato en varios minutos bajo condiciones de 60 a 93 C en una solución de H_2SO_4 al 87 % en peso y de 85 a 90 C en una solución de H_2SO_4 al 90 % en peso. (Suasnavas Flores, 2017)

A la mezcla se introduce en una solución acuosa de hidróxido de sodio, para neutralizar el ácido tereftálico TPA y elevar el pH del sistema entre 7.5 a 8. Inmediatamente la mezcla se diluye con agua fría, y después con álcalis para obtener un nivel de pH 11. La solución obtenida tiene una coloración oscura y contiene TPA (en forma de sal de sodio soluble en agua), sulfato de sodio, EG, e hidróxido de sodio y también una pequeña cantidad de impurezas insolubles que se filtran usando métodos tradicionales. La siguiente etapa del proceso es la acidificación de la solución usando ácido sulfúrico o clorhídrico con el fin de

precipitar TPA. Después de filtrar, lavar con agua, secar, se obtiene TPA de una pureza mayor al 99%. (Morales Palomino, 2010)

Objetivo de la sesión de laboratorio de Hidrolisis Ácida

- Obtener ácido tereftálico por hidrolisis ácida de 5 casos de envases post consumo de polietileno de tereftalato (PET).

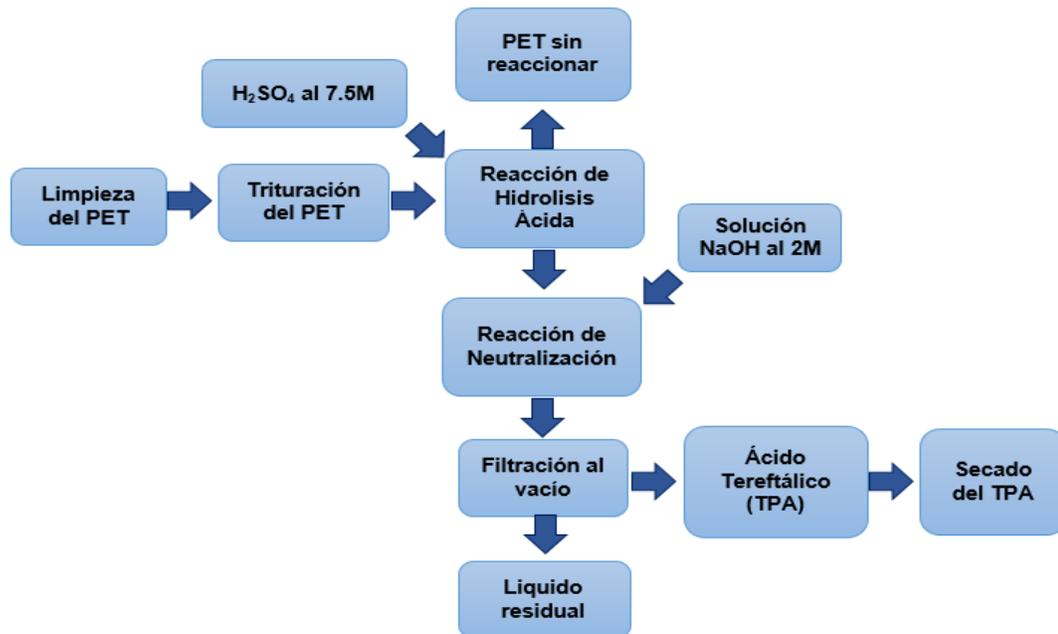
Materiales:

- PET triturado de cada caso a estudiar
- Agua destilada
- Ácido sulfúrico
- Hidróxido de sodio
- Balanza analítica
- Plancha de calentamiento con agitación
- Vidrio reloj
- Termómetro
- Cocinilla eléctrica
- Beaker (vaso precipitado)
- Varilla de Vidrio
- Embudo de vidrio
- Matraz Erlenmeyer
- Papel filtro
- Espátula

4.3.5.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL HIDROLISIS ÁCIDA

A continuación se muestra un diagrama de bloques que representa los pasos a seguir para el desarrollo de las sesiones experimentales de hidrolisis ácida del PET para estudiar los 5 casos estudio.

Figura 4.33 Diagrama de bloques – Hidrolisis Ácida



Fuente: Elaboración Propia a partir de información recopilada, 2022

➤ **HIDRÓLISIS ÁCIDA UTILIZANDO ÁCIDO SULFÚRICO AL 7.5 M**

1. Se prepara la solución de 10ml de ácido sulfúrico al 7.5 M en base a los cálculos realizados. Véase Anexo 2
2. Se pesa 1g de cada caso a estudiar de envases PET en la balanza analítica
3. Mezclar en un vaso precipitado limpio los 1g de PET (en cada caso estudiado) y la solución previamente preparada de H₂SO₄/H₂O al 7.5M, con ayuda de una varilla de vidrio.

Figura 4.34 Mezcla de solución de ácido sulfúrico al 7.5M con PET

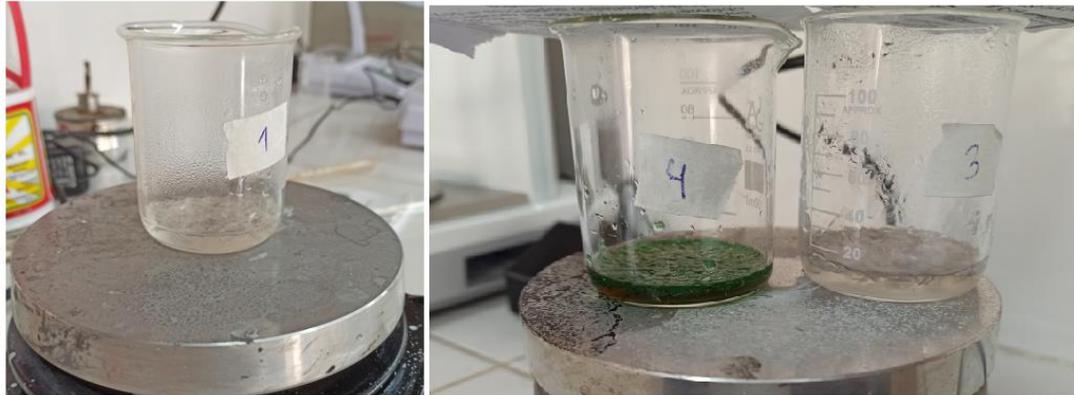


Fuente: Elaboración Propia, 2022

Proceso Hidrolisis Ácida

4. Se colocar el vaso precipitado con la mezcla de ácido sulfúrico al 7.5M y el PET triturado, de cada caso, sobre la plancha de calentamiento para calentar la muestra.

Figura 4.35 PET triturado y solución de ácido sulfúrico al 7.5M en la plancha de calentamiento



Fuente: Elaboración Propia, 2022

5. Se empieza a subir gradualmente la temperatura hasta llegar a 100°C, evitando superar los 150°C. (usualmente el tiempo de residencia es de 2 horas) a presión atmosférica.
6. Se observa a que tiempo y temperatura las escamas de PET triturado se tornan blanquecinas o adquieren otra coloración diferente, y estas se desintegran en trozos más pequeños.

Figura 4.36 Casos estudiados luego de la reacción de hidrolisis acida



Fuente: Elaboración Propia, 2022

- Finalmente se busca completar la degradación del PET (a 100-120 min aproximadamente de iniciado el proceso), observándose que la coloración de las muestras resulta ser de un marrón oscuro, como se muestra en la figura anterior.

Neutralización de la mezcla

- Se debe neutralizar la mezcla con una solución de 5ml de hidróxido de sodio a 5M, para posteriormente dejarla reposar por al menos 24 horas. Véase Anexo 3
- Posterior al tiempo de reposo, se separa los residuos de PET que no hayan reaccionado de la muestra obtenida.
- Se pesan estos restos de PET secos a un vidrio de reloj y pesar la cantidad de PET que no reaccionó.

Separación del producto obtenido (TPA).

- Se filtran cada una de las soluciones obtenidas con papel filtro y un embudo, teóricamente lo que queda en el papel filtro es el ácido tereftálico (TPA).

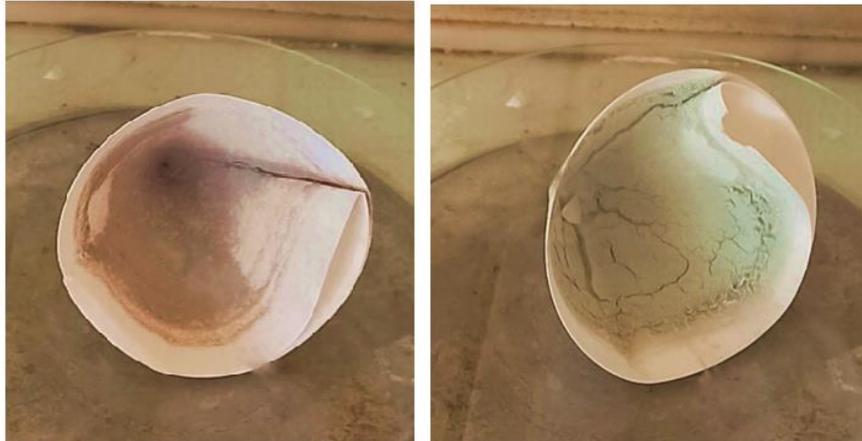
Figura 4.37 Filtrado de Ácido tereftálico de la solución neutralizada con NaOH



Fuente: Elaboración Propia, 2022

- Tras el filtrado, se pesa el ácido tereftálico presente en el papel filtro

Figura 4.38 Acido Tereftalico obtenido por Hidrolisis Acida



Fuente: Elaboración Propia, 2022

4.3.5.2. CALCULOS RENDIMIENTO DE LA REACCION DE HIDRÓLISIS ÁCIDA DE PET

A continuación se procede a realizar el cálculo de los rendimientos obtenidos por la hidrolisis acida utilizando una solución de ácido sulfúrico al 7.5M como solvente de cada caso estudio del presente proyecto de investigación.

➤ CASO 1. PET 100% RESINA VIRGEN - TRANSPARENTE

Tabla 4.28 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 1

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	1.0125 gramos
Ácido sulfúrico al 7.5 M	10 mL
Hidróxido de sodio al 5M	5 mL
Ácido tereftalico obtenido	0.4157 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Calculo del rendimiento según la ecuación 4.6

$$Rendimiento(\%)_{CASO\ 1} = \frac{\frac{0.4157\ g}{166.13\ g/mol}}{\frac{1.0125\ g}{192.2\ g/mol}} * 100 = 47.50\%$$

➤ **CASO 2. PET 100% RESINA RECICLADA - TRANSPARENTE**

Tabla 4.29 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 2

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	1.1013 gramos
Ácido sulfúrico al 7.5 M	10 mL
Hidróxido de sodio al 5M	5 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.5406 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.6

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 2}} = \frac{\frac{0.5406 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{1.1013 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 56.79\%$$

➤ **CASO 3. PET VIRGEN al 70% y PET RECICLADO AL 30% TRANSPARENTE**

Tabla 4.30 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 3

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	1.0876 gramos
Ácido sulfúrico al 7.5 M	10 mL
Hidróxido de sodio al 5M	5 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.7221 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.5

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 3}} = \frac{\frac{0.7221 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{1.0876 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 76.81\%$$

➤ **CASO 4. PET 70% RESINA VIRGEN y 30% RESINA RECICLADA - VERDE**

Tabla 4.31 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 4

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	1.1005 gramos
Ácido sulfúrico al 7.5 M	10 mL
Hidróxido de sodio al 5M	5 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.7337 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se calcula el rendimiento según la ecuación 4.5

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 4}} = \frac{\frac{0.7337 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{1.1005 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 77.13\%$$

➤ **CASO 5.** PET 100% RESINA VIRGEN - AMBAR

Tabla 4.32 Cantidad de reactivos y productos para el Caso 5

REACTIVO	CANTIDAD
Polietileno de Tereftalato (PET)	1.0520 gramos
Ácido sulfúrico al 7.5 M	10 mL
Hidróxido de sodio al 5M	5 mL
Ácido tereftálico obtenido	0.4127 gramos

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Calculo del rendimiento según la ecuación 4.5

$$\text{Rendimiento}(\%)_{\text{CASO 5}} = \frac{\frac{0.4127 \text{ g}}{166.13 \text{ g/mol}}}{\frac{1.0520 \text{ g}}{192.2 \text{ g/mol}}} * 100 = 45.38\%$$

Recopilando los rendimientos obtenidos en cada uno de los casos estudiados, se tiene la siguiente tabla:

Tabla 4.33 Casos de reciclaje químico y sus respectivos rendimientos por hidrólisis ácida (%)

# CASO	ENVASE PET	RENDIMIENTO
CASO #1	TRANSPARENTE 100% Resina Virgen	47.50%
CASO #2	TRANSPARENTE 100% Resina Reciclada	56.79%
CASO #3	TRANSPARENTE 70% Resina Virgen y 30% Resina Reciclada	76.81%
CASO#4	VERDE 70% Resina Virgen y 30% Resina Reciclada	77.13%
CASO#5	AMBAR 100% Resina Virgen	45.38%

Fuente: Elaboración Propia, 2022

4.3.5.3. DISCUSIÓN DE LA PRÁCTICA DE HIDROLISIS ÁCIDA

Con el método de hidrólisis ácida, utilizando como solvente degradante a una solución de ácido sulfúrico al 7.5 M, se obtuvieron rendimientos mayores al 51% en 3 de los 5 casos evaluados, evidenciando que la solución de ácido sulfúrico al 7.5M acelera y promueve mayor degradación del PET permitiendo recuperar una importante cantidad de ácido tereftálico, sin embargo el manejo de temperatura resulta crucial para que así el azufre presente en la solución no se convierta en dióxido o trióxido de azufre, cuya presencia es denotada por la coloración marrón de la solución posterior a la degradación, coloración que es difícil de separar del producto obtenido que es el ácido tereftálico (TPA).

El primer caso estudia a un envase PET 100% virgen, el cual obtiene un rendimiento de 47.50%, siendo uno de los más bajos obtenidos, al igual que en los casos anteriores, la resina PET virgen al 100% ofrece mayor resistencia a la hora de la degradación, lo cual no ha favorecido a la obtención de ácido tereftálico, además se debe indicar que la coloración obtenida de esta muestra es ligeramente marrón por la presencia de óxido de azufre.

En el segundo caso, se estudia a un envase PET 100% resina reciclada, en este caso se obtuvo un rendimiento de 56.79%, mayor que el caso anterior. Además en se llegó a la degradación del PET de manera más rápida que en otros casos, no obstante es también el caso que registró mayor formación de óxidos de azufre siendo la coloración de la muestra más oscura que el caso 1. De forma contraria al primer caso, nuevamente este tipo de envases muestra menor resistencia a la degradación, sin embargo dicha característica al momento de la práctica no resulta tan ventajosa, ya que la degradación viene acompañada de la formación de óxidos de azufre, el cual termina dando una coloración oscura al producto obtenido.

En el tercer caso, se estudia a un envase PET 70% resina virgen y 30% resina reciclada, el cual obtuvo un rendimiento de 76.81%. Esto debido a que al ser producto de la mezcla de resina virgen con reciclada, también presenta cierta resistencia al momento de degradación, pero no tanta como el envase que está hecho de 100% resina PET virgen. La resistencia a la degradación que ofrece este envase, permite que la degradación no se dé de manera acelerada, logrando completar en mayor proporción la degradación y obtención de ácido tereftálico.

En el cuarto caso, se estudia un envase PET 70% resina virgen y 30% resina reciclada de color verde translucido. El rendimiento obtenido es de 77.13%, muy similar al caso 3, lo cual puede indicar que se puede obtener aprovechar este tipo de envase de igual forma que un envase transparente mediante reciclaje químico por hidrólisis ácida. No obstante el buen rendimiento obtenido, la muestra de ácido tereftálico recuperada conserva la coloración del envase, con tonalidad verdosa.

El último caso que se estudia, es de un envase PET 100% virgen de color ámbar oscuro, el cual obtuvo el rendimiento de 45.38%, siendo el rendimiento más bajo, lo cual puede deberse, como en los otros casos, a su alto contenido de colorante en el envase, y a que se trata de una resina virgen al 100%, por lo cual también ofrece cierta resistencia al momento de la degradación como en el primer caso. El ácido tereftálico obtenido en este caso no es del color blanco sino de color marrón.

4.3.5.4. CONCLUSIONES DE LA PRACTICA DE HIDROLISIS ACIDA DEL PET

- Se evaluó el reciclaje químico de residuos post consumo de polietileno de tereftalato (PET) mediante hidrolisis ácida para obtener ácido tereftalico (TPA) de 5 casos estudio. Se observó que por este método, en términos de rendimiento, los mejores resultados obtenidos corresponden al envase de 70% PET resina virgen y 30% resina reciclada, tanto del caso del envase verde como el de envase transparente, debido a que estos envases ofrecieron cierta resistencia a la degradación, lo cual permitió que se forme mayor cantidad de ácido tereftalico antes del inicio de formación de los óxidos de azufre.
- De manera opuesta entre los menores rendimientos están aquellos casos de resina PET 100% resina virgen, tanto el caso del envase transparente como el del ámbar, esto se debería a que el PET 100% virgen es el tipo de resina que ofrece más resistencia a la degradación y se tuvo que retirar las muestras de la fuente de calor antes de que se formen mayores cantidades de oxidos de azufre en la muestra sin haber completado la degradación.
- Todas las muestras obtenidas de ácido tereftalico (TPA) de cada caso estudio, tuvieron una coloración marrón, en algunos casos el marrón fue más intensos que en otros, lo cual denoto la presencia de oxidos de azufre en las muestras. Dicha coloración, representaría un proceso algo más complejo para purificar más el TPA obtenido.
- La hipótesis de investigación se ve corroborada en el caso de hidrolisis acida, ya que con este método se obtuvieron rendimientos de recuperación de ácido tereftalico superiores al 51% en 3 de los 5 casos estudiados.

4.3.6. IDENTIFICACIÓN DEL ÁCIDO TEREFTALICO OBTENIDO EN CADA TIPO DE HIDRÓLISIS.

De cada prueba de hidrolisis realizada, tanto hidrolisis neutra, básica y acida, evaluando los 5 casos estudio, se obtuvo lo que teóricamente sería ácido tereftalico

(TPA), cuya apariencia típica es de un polvo fino blanco, sin embargo es necesario corroborar que efectivamente las partículas blancas obtenidas son ácido tereftálico y para ello se recurre a conceptos teóricos y a una sencilla prueba descrita a continuación.

El ácido tereftálico (TPA) es un ácido carboxílico, y para comprobar que lo obtenido efectivamente se trata de un ácido carboxílico en todos los casos estudiados, se procede a realizar una prueba de verificación con ayuda del bicarbonato de sodio.

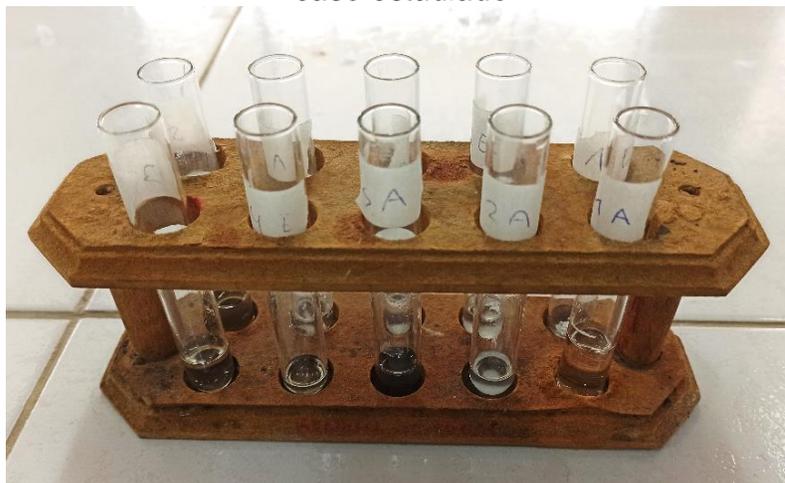
Teóricamente, los ácidos carboxílicos reaccionan con bases para formar sales. En estas sales el hidrógeno del grupo OH se reemplaza con el ion de un metal, por ejemplo Na⁺. De esta forma, el ácido acético, que es un ácido carboxílico, reacciona con bicarbonato de sodio para dar acetato de sodio, dióxido de carbono y agua.



En base a esto, es que se prepara una muestra de solución saturada de bicarbonato de sodio y agua (NaHCO₃/Agua destilada) de 2ml aproximadamente de volumen para cada caso.

1. En cada tubo de ensayo seco se agrega una pizca del ácido tereftálico obtenido en cada caso y para cada tipo de hidrólisis realizada.

Figura 4.39 Identificación del Ácido carboxílico con Bicarbonato de Sodio de cada caso estudiado



Fuente: Elaboración Propia, 2022

2. Posteriormente al cada tubo de ensayo se añade 2 ml de la solución de bicarbonato de sodio y agua para así constatar la efervescencia formada por la formación de dióxido de carbono.

Todas las muestras de ácido tereftálico produjeron la reacción esperada, para cada caso estudiado y para cada método de hidrólisis aplicado, verificando de esta manera que el producto obtenido se trata de un ácido carboxílico como el ácido tereftálico.

Figura 4.40 Formación de Dióxido de carbono por adición de Bicarbonato de sodio para los tres métodos de hidrólisis aplicados



Fuente: Elaboración Propia, 2022

4.3.7. ANALISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE SOLVÓLISIS REALIZADOS

Luego de obtener los resultados para cada método de solvolisis realizado en el presente proyecto de investigación, es decir, solvolisis por hidrólisis neutra, básica y ácida, se debe realizar un análisis comparativo y así poder determinar que método de solvolisis sería el más conveniente y con mayor potencial para poder ser aplicado a futuro.

Para poder realizar un análisis comparativo se va a considerar los siguientes aspectos:

OBTENCIÓN DE ÁCIDO TEREFTÁLICO POR SOLVÓLISIS A PARTIR DE POLIETILENO DE TEREFTALATO EN LA CIUDAD DE EL ALTO

- Presiones y Temperaturas en cada tipo de hidrólisis
- Duración del tiempo de degradación
- Rendimientos alcanzados
- Reactivos utilizados

Todos estos aspectos se muestran sintetizados en la siguiente tabla resumen de los métodos de solvólisis aplicados en el presente proyecto.

Tabla 4.34 Resumen de los métodos realizados en laboratorio

Tipo de Hidrólisis	Reactivo y Concentración	Variables de Operación	#CASO	RENDIMIENTO (%)
Neutra	Agua. Relación en peso PET/agua (1:6 a 1:12)	Presión: 1 - 4 Mpa. Tiempo: 5 - 4h. Temp: 180 - 220°C	CASO #1	11.48%
			CASO #2	16.36%
			CASO #3	13.35%
			CASO #4	12.80%
			CASO #5	8.02%
Básica con Agua	NaOH al 2M en agua, H ₂ SO ₄ al 98% para neutralizar.	Presión atmosférica Tiempo: 1.5 – 2h. Temp: 87- 115°C	CASO #1	40.33%
			CASO #2	45.90%
			CASO #3	41.34%
			CASO #4	41.23%
			CASO #5	33.25%
Básica con Etanol	NaOH 4 - 20 % masa con etanol. H ₂ SO ₄ al 98% para neutralizar.	NaOH en 7 mL etanol. 1g PET. Temp: 80°- 85°C a 400 rpm. Tiempo: 40 min. Neutralizar con H ₂ SO ₄ 2M	CASO #1	58.12%
			CASO #2	86.95%
			CASO #3	61.28%
			CASO #4	56.57%
			CASO #5	45.40%
Ácida	H ₂ SO ₄ al 7.5M. NaOH al 2M para neutralizar	Temp: 85-90°C, 40 minutos a presión atmosférica. Neutralizar pH a 7-5 u 8. Filtrar y secar residuo.	CASO #1	47.50%
			CASO #2	56.79%
			CASO #3	76.81%
			CASO #4	77.13%
			CASO #5	45.38%

Fuente: Elaboración Propia, 2022

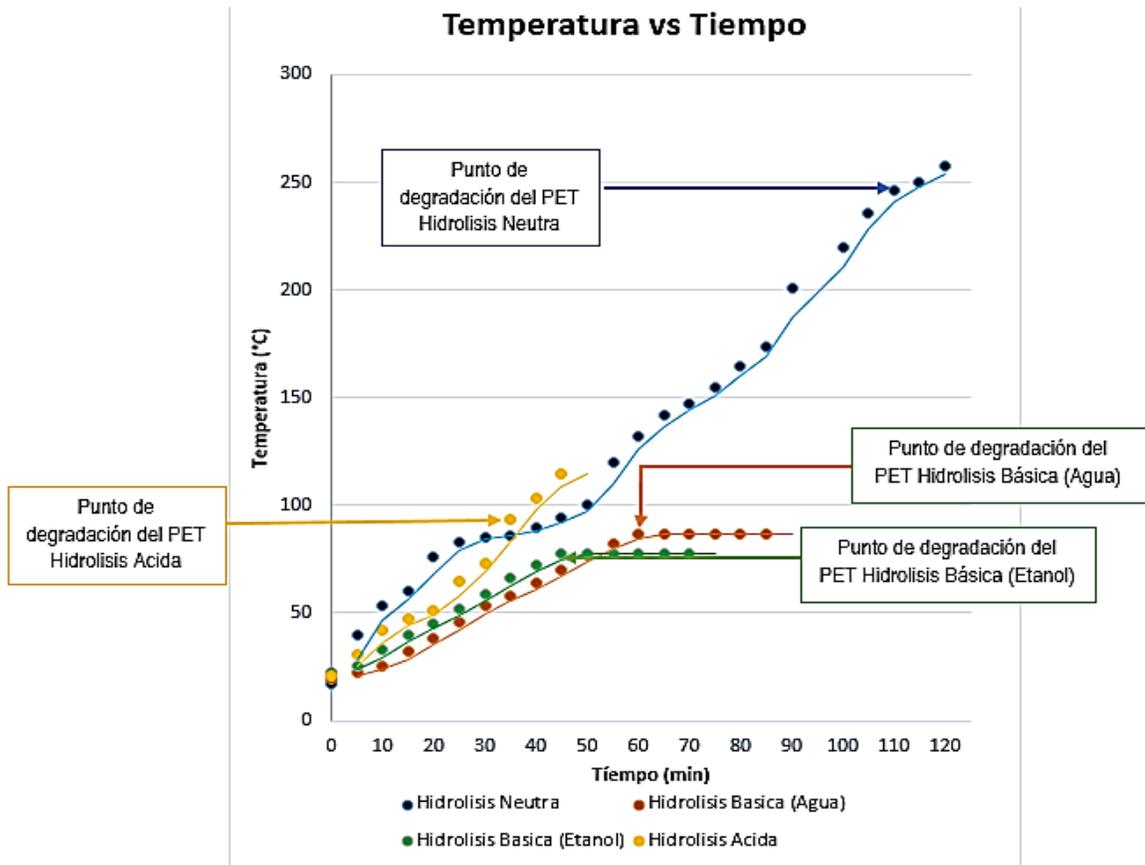
En base a la tabla anterior, se observa que el método de solvólisis por hidrólisis neutra, es un método para la obtención de ácido tereftálico (TPA) que utiliza reactivos sencillos (solo PET y agua) pero tiempos prolongados de degradación, de 4 a 5 horas. También se trabaja a condiciones severas, a elevadas presiones y temperaturas, y los rendimientos obtenidos son los más bajos de todos los métodos evaluados, no cumpliendo así con la hipótesis planteada en el presente proyecto en ninguno de los casos estudio.

En el caso de la hidrólisis básica, los reactivos principales además del PET triturado son el hidróxido de sodio y el ácido sulfúrico y también se puede utilizar etanol como solvente. Además se trabaja a presiones y temperaturas moderadas, logrando rendimientos que superan el 51% en 4 de los 5 casos estudiados, cumpliendo de esta manera la hipótesis.

En la hidrólisis ácida, el reactivo principal para la etapa de degradación es el ácido sulfúrico a una concentración de 7.5M, también es necesario para neutralizar una solución al 5M de hidróxido de sodio. Éste método necesita mayores cantidades de reactivos químicos y se trabaja a presión atmosférica, y si bien el tiempo de degradación del PET es menor que en los otros métodos, se debe tener mucho cuidado con el control de la temperatura ya que hay tendencia a formación de óxidos de azufre además del ácido tereftálico, dándole una coloración ligeramente marrón a las muestras obtenidas. Solo en tres casos estudio se pudo superar el 51% de rendimiento.

El siguiente gráfico corresponde a Temperatura vs Tiempo, en el cual se observa de manera clara las diferencias en estas variables para cada uno de los métodos de solvólisis aplicados.

Figura 4.41 Grafico Temperatura vs. Tiempo de los métodos de solvolisis aplicados



Fuente: Elaboración Propia, 2022

De acuerdo a la anterior figura, se necesita mayores temperaturas para realizar la hidrólisis neutra, para que se comience la degradación o despolimerización del PET. En el caso de la hidrólisis básica tanto con agua o etanol como solvente, las temperaturas para que comience la degradación están entre los 75 a 90 C, sin embargo el tiempo de degradación es menor en la hidrólisis básica con etanol que con agua. Mientras que para el caso de la hidrólisis ácida, se llega al punto de degradación y el tiempo para que se complete la degradación es corto en comparación a los otros métodos, ya que se debe quitar la solución de la fuente de calor antes de la formación de óxidos de azufre.

Es por ello que en base a los resultados obtenidos de los tres métodos de hidrólisis realizados en laboratorio,

Tabla 4.35 Evaluación de las ventajas y desventajas de los métodos de hidrolisis

TIPO DE HIDROLISIS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
NEUTRA	<ul style="list-style-type: none"> - Los reactivos a utilizar son sencillos (solo agua destilada y el residuo PET) 	<ul style="list-style-type: none"> - Se trabaja a altas presiones y temperaturas, lo cual complica el proceso ya que se debe tener los equipos adecuados para llegar a esas condiciones de operación. - El tiempo para completar la degradación puede estar entre las 4 - 5 horas. - No se cumplió la hipótesis de recuperación de ácido tereftálico en ninguno de los casos estudio.
BÁSICA CON AGUA	<ul style="list-style-type: none"> - Se trabaja a moderadas presiones y temperaturas. - Además del PET triturado y agua destilada, se utiliza hidróxido de sodio y ácido sulfúrico en pequeñas cantidades. 	<ul style="list-style-type: none"> - El tiempo para completar la degradación puede estar entre las 1.5 - 2 horas. - No se cumplió la hipótesis de recuperación de ácido tereftálico en ninguno de los casos estudio.
BÁSICA CON ETANOL	<ul style="list-style-type: none"> - Se trabaja a presión atmosférica y temperatura ambiente. - El tiempo de degradación esta entre los 40 - 60 minutos - Se cumplió la hipótesis de recuperación de ácido tereftálico en 4 de los 5 casos estudio - Además del PET triturado y agua destilada, se utiliza hidróxido de sodio y ácido sulfúrico en moderadas cantidades. 	<ul style="list-style-type: none"> - Este tipo de hidrolisis utiliza etanol en vez de agua destilada, un solvente más costoso que el agua.
ACIDA	<ul style="list-style-type: none"> - Se trabaja a presión atmosférica y temperaturas moderadas. - El tiempo de degradación esta entre los 40 - 50 minutos - Se cumplió la hipótesis de recuperación de ácido tereftálico en 3 de los 5 casos estudio 	<ul style="list-style-type: none"> - Este tipo de hidrolisis utiliza mayores cantidades de reactivos, sobre todo de ácido sulfúrico. - Hay una gran tendencia de la formación de óxidos de azufre a la par de la degradación de PET, lo cual termina dando un tono marrón al TPA obtenido.

Fuente: Elaboración Propia, 2022

En base a la evaluación de las ventajas y desventajas de cada método de hidrolisis realizado en laboratorio, se observan que el método que parece ser el más favorable en aplicación es el método de solvolisis por hidrolisis básica utilizando al etanol como solvente. Éste resulta una forma de degradación que tiene buenos rendimientos de recuperación de ácido tereftálico, los reactivos son utilizados en moderadas cantidades a excepción del etanol, las condiciones de operación no son

severas y el tiempo de degradación es considerablemente corto en comparación a otros métodos.

Entonces, en base a todo lo anterior mencionado el **método de solvolisis por hidrolisis básica con etanol como solvente**, resulta ser el método con más potencial para ser aplicado como parte de un reciclaje químico en la ciudad de El Alto.

4.3.7.1. POTENCIAL ECONOMICO DEL METODO DE HIDROLISIS BASICA CON ETANOL COMO SOLVENTE PARA TRATAR LOS RESIDUOS PET EN LA CIUDAD DE EL ALTO

Desafortunadamente, a pesar de que en teoría el reciclaje químico de plásticos resulta ser el más conveniente para cumplir con los principios de la economía circular, en temas económicos, aún sigue siendo una práctica que tiene muchos desafíos que superar.

El uso de determinados reactivos como es el caso del ácido sulfúrico, suele complicar la rentabilidad de los métodos de reciclaje químico del PET, es por ello que a continuación, y luego de haber determinado el método de solvolisis con mayor potencial de aplicación, es que ahora se evalúa el aspecto económico que este método implicaría, analizando a los reactivos utilizados y el producto potencial a obtener en base a los residuos PET generados en la ciudad de El Alto calculados al inicio del presente capítulo.

De acuerdo a los cálculos realizados, el año 2021 se habrían generado aproximadamente **2792.11 toneladas métricas** de envases de polietileno de tereftalato (PET), en la ciudad de El Alto, y este dato será el utilizado para calcular la cantidad de reactivos necesarios para tratar esta cantidad de residuos PET, la cual es la materia prima del reciclaje químico, mediante el método determinado con mayor potencial como el de solvolisis por hidrolisis básica con etanol como solvente.

A continuación en la siguiente tabla, se muestran los precios de los reactivos necesarios para llevar a cabo el reciclaje químico de PET.

OBTENCIÓN DE ÁCIDO TEREFTÁLICO POR SOLVÓLISIS A PARTIR DE POLIETILENO DE TEREFTALATO EN LA CIUDAD DE EL ALTO

Tabla 4.36 Precios de reactivos y producto para el reciclaje químico de PET

REACTIVO O PRODUCTO	CANTIDAD	PRECIO
Botellas PET post consumo recolectadas	1Kg	1.80 Bs
Etanol (96 grados Gay Luusac)	1L	10 Bs
Hidróxido de sodio	1Kg	17 Bs
Ácido sulfúrico al 98% (Precio Internacional)	5L	172 Bs
Agua destilada (a granel)	1L	3.5 Bs
High Quality Pure Terephthalic Acid (PTA) /Purified Terephthalic Acid (Acido tereftalico de alta pureza)	100Kg	696 Bs

Fuente: Elaboración Propia en base a información recopilada, 2022

Se procede a realizar los cálculos en base a la experiencia obtenida en laboratorio para aplicar el método de solvolisis por hidrolisis básica con etanol como solvente.

Análisis de reactivos para el reciclaje químico de PET

- **Botellas PET post consumo**

Se realiza el cálculo con el dato del precio del kilo del residuo PET en el mercado, que es 1Kg = 1.8 Bs

$$2792.11 \text{ Ton} * \frac{1000 \text{ Kg PET}}{1 \text{ Ton PET}} * \frac{1.80 \text{ Bs}}{1 \text{ Kg de PET}} = 5.025.798 \text{ Bs}$$

- **Etanol al 96° GL**

Se realiza el cálculo con el dato del precio del etanol en el mercado, que es 1litro = 10 Bs y con la cantidad de etanol utilizada en la práctica por hidrolisis básica con etanol como solvente.

$$2792.11 \text{ Ton} * \frac{1000 \text{ Kg PET}}{1 \text{ Ton PET}} * \frac{1000 \text{ g PET}}{1 \text{ Kg de PET}} * \frac{7 \text{ ml Etanol}}{1 \text{ g PET}} * \frac{10 \text{ Bs}}{1000 \text{ ml Etanol}} = 19.544.770 \text{ Bs}$$

- **Hidróxido de sodio (NaOH)**

Se realiza el cálculo con el dato del precio del hidróxido de sodio en el mercado, que es 1Kg = 17 Bs y con la cantidad de este reactivo utilizada en la práctica por hidrolisis básica con etanol como solvente.

$$2792.11 \text{ Ton} * \frac{1000 \text{ Kg PET}}{1 \text{ Ton PET}} * \frac{1000 \text{ g PET}}{1 \text{ Kg de PET}} * \frac{0.5 \text{ g NaOH}}{1 \text{ g PET}} * \frac{17 \text{ Bs}}{1000 \text{ g NaOH}} = 23.732.935 \text{ Bs}$$

- **Ácido Sulfúrico al 98% (H₂SO₄)**

Se realiza el cálculo con el dato del precio del ácido sulfúrico al 98% en el mercado a nivel internacional, que es de 5L = 24.7 \$us, transformado en bolivianos 5L = 172 y con la cantidad de este reactivo utilizada en la práctica por hidrolisis básica con etanol como solvente.

$$2792.11 \text{ Ton} * \frac{1000 \text{ Kg PET}}{1 \text{ Ton PET}} * \frac{1000 \text{ g PET}}{1 \text{ Kg de PET}} * \frac{3 \text{ ml H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 2\text{M}}{1 \text{ g PET}} * \frac{1.09 \text{ ml s. c. al } 98\%}{10 \text{ ml H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 2\text{M}} * \frac{172 \text{ Bs}}{5000 \text{ ml s. c. al } 98\%} = 31.407.887 \text{ Bs}$$

- **Agua Destilada**

Se realiza el cálculo con el dato del precio del agua destilada en el mercado, que es de 1L = 3.5Bs, y con la cantidad de este insumo utilizado en la práctica por hidrolisis básica con etanol como solvente.

$$2792.11 \text{ Ton} * \frac{1000 \text{ Kg PET}}{1 \text{ Ton PET}} * \frac{1000 \text{ g PET}}{1 \text{ Kg de PET}} * \frac{3 \text{ ml H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 2\text{M}}{1 \text{ g PET}} * \frac{9.81 \text{ ml (Agua Dest)}}{10 \text{ ml H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 2\text{M}} * \frac{3.5 \text{ Bs}}{1000 \text{ ml (Agua Dest)}} = 28.760.129 \text{ Bs}$$

Recopilando todos los precios calculados de los reactivos se genera la siguiente tabla:

Tabla 4.37 Inversión necesaria en reactivos para producir ácido tereftálico (TPA)

REACTIVO UTILIZADO	INVERSION NECESARIA
Botella PET post consumo	5.025.798 Bs
Etanol al 96° GL	19.544.770 Bs
Hidróxido de sodio (NaOH)	23.732.935 Bs
Ácido Sulfúrico al 98% (H ₂ SO ₄)	31.407.887 Bs
Agua Destilada	28.760.129 Bs
TOTAL NECESARIO EN REACTIVOS	108.471.519 Bs

Fuente: Elaboración Propia, 2022

De acuerdo a la anterior tabla, se necesitaría una inversión de 108.471.519 Bs aproximadamente en reactivos para tratar químicamente por hidrolisis básica con etanol como solvente esas 2792.11 Toneladas métricas generadas de residuos PET al año en la ciudad de El Alto.

Análisis del producto obtenido para el reciclaje químico de PET

Para realizar los cálculos de costos del producto obtenido, inicialmente se debe realizar los cálculos de la cantidad de ácido tereftálico (TPA) que se puede recuperar a partir de esas 2792.11 toneladas métricas de PET generadas en la ciudad de El Alto al año.

Para ello se utilizara como dato la masa obtenida de ácido tereftálico del caso #3 por hidrolisis básica con etanol como solvente. Se escoge este dato como referencia, ya que se trata del envase PET transparente de composición: 70% resina virgen y 30% resina reciclada, debido a que este tipo de envase es el que más abunda en el país por el D.S. 2887 del 31 de agosto del 2016, el cual instruye a las empresas que producen botellas PET, a incluir obligatoriamente en la cadena productiva material PET reciclado en al menos treinta por ciento (30%) en los envases que produce.

En el caso #3 por el método de hidrolisis básica con etanol como solvente se partió de 1 gramo de PET triturado de composición 70% resina virgen y 30% resina reciclada, y se obtuvo 0.5328 gramos de ácido tereftálico, este último dato será el usado para escalar los cálculos.

- ***Cantidad de Ácido Tereftálico que puede ser producido:***

$$2792.11 \text{ Ton} * \frac{1000 \text{ Kg PET}}{1 \text{ Ton PET}} * \frac{1000 \text{ g PET}}{1 \text{ Kg de PET}} * \frac{0.5328 \text{ g TPA}}{1 \text{ g PET}} * \frac{1 \text{ Kg TPA}}{1000 \text{ g TPA}} * \frac{1 \text{ Ton TPA}}{1000 \text{ Kg TPA}}$$

$$= 1487.64 \text{ Ton TPA}$$

Si asumimos la cantidad de 2792.11 toneladas métricas de residuos PET generados al año como materia prima, aplicando el método de hidrolisis básica con etanol como

sovente se podría recuperar ácido tereftálico en una masa aproximada de 1487.64 toneladas métricas anuales. Esta cantidad de producción correspondería más a la producción de una planta piloto, para una planta más grande se tendría que contar con mayor cantidad de materia prima.

En base al dato obtenido, se procede a calcular el precio:

$$1487.64 \text{ Ton TPA} * \frac{1000 \text{ Kg TPA}}{1 \text{ Ton TPA}} * \frac{696 \text{ Bs}}{100 \text{ Kg TPA}} = 10.353.948 \text{ Bs}$$

El resultado obtenido se refleja en la siguiente tabla:

Tabla 4.38 Costo Acido Tereftálico producido de los residuos PET generados al año en El Alto

PRODUCTO OBTENIDO	COSTO PRODUCTO
Ácido Tereftálico (TPA)	10.353.948 Bs

Fuente: Elaboración Propia, 2022

De las tablas anteriores, se puede ver que solo analizando el costo de los reactivos, la inversión no justifica el costo del producto final y es éste el principal obstáculo para la aplicación del reciclaje químico del PET a nivel industrial. De acuerdo al análisis, cuestan 10 veces más los reactivos utilizados en el proceso de reciclaje químico que lo que cuesta el producto obtenido (TPA). Notoriamente, está situación no resulta conveniente para ningún inversor y es por ello que es un área que se continua investigando a nivel mundial. Por lo tanto, el presente proyecto de investigación, además de todos los objetivos indicados en el capítulo 1, también pretende ser un aporte investigativo que promueva aún más estudios sobre este tipo de reciclaje y sobre las opciones que se tendrían para hacer la práctica de solvolisis por hidrolisis del PET rentable.

4.4. VALIDACION DE LA HIPOTESIS DE INVESTIGACION

A continuación se recuerda la hipótesis de investigación planteada en el capítulo 1 del presente proyecto de investigación:

Hi: El reciclaje químico de residuos post consumo de polietileno de tereftalato por el método de solvólisis, permite recuperar ácido tereftálico con un rendimiento de conversión del polímero a monómeros, igual o superior al 51%, proyectándose como una opción más de reciclaje de residuos PET generados en la ciudad de El Alto.

Claramente luego del correspondiente análisis a cada método de solvólisis ejecutado en el proyecto de investigación, en el cual se pudo recuperar ácido tereftálico a partir de residuos post consumo de polietileno de tereftalato (PET), se observa que hay casos específicos en los cuales si se cumple la hipótesis y otros en los que no.

Tabla 4.39 Validación de la Hipótesis de investigación en los métodos de solvólisis realizados

Tipo de Hidrólisis	#CASO	RENDIMIENTO (%)	VALIDA LA HIPOTESIS DE INVESTIGACIÓN
Neutra	CASO #1	11.48%	NO
	CASO #2	16.36%	NO
	CASO #3	13.35%	NO
	CASO #4	12.80%	NO
	CASO #5	8.02%	NO
Básica con Agua	CASO #1	40.33%	NO
	CASO #2	45.90%	NO
	CASO #3	41.34%	NO
	CASO #4	41.23%	NO
	CASO #5	33.25%	NO
Básica con Etanol	CASO #1	58.12%	SI
	CASO #2	86.95%	SI
	CASO #3	61.28%	SI
	CASO #4	56.57%	SI
	CASO #5	45.40%	NO
Ácida	CASO #1	47.50%	NO

	CASO #2	56.79%	SI
	CASO #3	76.81%	SI
	CASO #4	77.13%	SI
	CASO #5	45.38%	NO

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Como se observa en la tabla anterior, en las 20 pruebas de hidrolisis realizadas mediante diversos métodos (neutra, básica y acida), solo en 7 se pudo obtener ácido tereftalico con un rendimiento mayor al 51%, siendo el método de solvolisis por hidrolisis básica con etanol como solvente, el que obtuvo más del 51% de ácido en 4 de los 5 casos estudiados.

A pesar de no haber obtenido más del 51% de ácido tereftalico en más casos estudio, no se puede despreciar la potencialidad de uno de los métodos de solvolisis realizados, que es el de hidrolisis básica con etanol como solvente, el cual demostró un gran potencial operacional para ser ejecutado al no necesitar de condiciones severas de operación ni tiempos extensos para la degradación del PET. Sin embargo se conoce también, que en aspectos económicos, aún hace falta poder optimizar este procedimiento para poder hacer rentable este método de recuperación de ácido tereftalico, por lo cual merece más investigación para que en un futuro se pueda aplicar en la ciudad de El Alto.

4.5. PARTICIPACION DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN EN FERIAS CIENTIFICAS

➤ VI Expo Ciencia Área de Ciencia y Tecnología 2022

El proyecto de investigación participo en ferias científicas en las cuales se difundió los resultados obtenidos en las sesiones experimentales. El título del proyecto presentado fue: "Reciclaje químico de PET para una Economía Circular", se eligió este título para ser llamativo a los asistentes y así puedan acercarse a ver la presentación, pero en esencia era el mismo proyecto de investigación de obtención de ácido tereftalico por solvolisis a partir de polietileno de tereftalato.

A continuación se muestran imágenes de la participación del equipo de investigación en la VI Expo Ciencia Área de Ciencia y Tecnología, realizada el 11 de octubre de 2022.

Figura 4.42 Equipo de Investigación en el stand designado para la presentación del proyecto en la VI Expo ciencia Área Ciencia y Tecnología 2022



Fuente: Elaboración Propia, 2022

El proyecto fue evaluado por docentes internos y externos a la universidad Pública de El Alto.

Figura 4.43 Exposición del proyecto en la VI Expo ciencia Área Ciencia y Tecnología 2022 ante los jurados evaluadores



Fuente: Elaboración Propia, 2022

OBTENCIÓN DE ÁCIDO TEREFTÁLICO POR SOLVÓLISIS A PARTIR DE POLIETILENO DE TEREFALATO EN LA CIUDAD DE EL ALTO

El título atrajo a varios visitantes al stand, a los cuales se les realizó la presentación del proyecto.

Figura 4.44 Exposición del proyecto VI Expo ciencia Área Ciencia y Tecnología 2022 ante visitantes interesados al stand



Fuente: Elaboración Propia, 2022

En esta feria se obtuvo el primer lugar entre los proyectos presentados por la carrera de Ingeniería de Gas y Petroquímica, lo cual permitió al proyecto representar al área de Ciencia y Tecnología en la Feria Institucional de la UPEA – Versión X.

Figura 4.45 Acto de Premiación a los primeros lugares de la VI Expo ciencia Área Ciencia y Tecnología 2022



Fuente: Elaboración Propia, 2022

OBTENCIÓN DE ÁCIDO TEREFTÁLICO POR SOLVÓLISIS A PARTIR DE POLIETILENO DE TEREFALATO EN LA CIUDAD DE EL ALTO

➤ **Feria Institucional de la UPEA 2022 – VERSION X**

Tras haber obtenido el primer lugar entre los proyectos presentados por la carrera de Ingeniería de Gas y Petroquímica, el proyecto de investigación “Reciclaje químico de PET para una Economía Circular” represento al Área de Ciencia y Tecnología en la Feria Institucional de la UPEA, el 21 de Octubre de 2022.

Figura 4.46 Equipo de Investigación en el stand designado para la presentación del proyecto en la Feria Institucional de la UPEA 2022



Fuente: Elaboración Propia, 2022

Figura 4.47 Exposición del proyecto en la Feria Institucional UPEA 2022 ante jurados evaluadores



Fuente: Elaboración Propia, 2022

OBTENCIÓN DE ÁCIDO TEREFÁTICO POR SOLVÓLISIS A PARTIR DE POLIETILENO DE TEREFALATO EN LA CIUDAD DE EL ALTO

De igual manera en esta presentación se evidencio del interés de estudiantes y de personas externas a la universidad, quienes tuvieron mucha curiosidad por saber de qué se trataba el proyecto.

Figura 4.48 Exposición del proyecto en la Feria Institucional UPEA 2022 ante estudiantes interesados en el tema



Fuente: Elaboración Propia, 2022

Estas presentaciones, ayudaron mucho al equipo de investigación para mejorar aún más el proyecto de investigación y notar de que es un tema de interés impulsa más la idea de que el reciclaje químico es un área que merece ser explorada y más investigada, ya que plantea posibles soluciones que puedan promover a una economía circular.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

- Se obtuvo ácido tereftálico por el método de solvólisis a partir de los residuos post consumo de polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto, mediante prácticas experimentales en laboratorio, en las cuales se evaluó el rendimiento de la reacción y con ello la potencialidad de los métodos para una futura aplicación en la ciudad. El método de solvolisis por hidrolisis básica con etanol como solvente resulto con mayor potencial para la obtención de ácido tereftalico en comparación con otros métodos.
- Se revisó el estado del arte referente a los tipos de reciclaje de polietileno de tereftalato, profundizando en los diferentes métodos de reciclaje químico por solvolisis de PET e identificando el método ideal para obtener ácido tereftalico de manera directa como es el método de solvolisis por hidrolisis. Además se conoció las aplicaciones del ácido tereftalico, siendo la más importante en la elaboración de resina virgen de PET.
- Se recopiló información sobre los residuos post consumo de polietileno de tereftalato generados anualmente en la ciudad de El Alto, y en base a ellos y mediante cálculos, se deduce que el 2021 se habrían generado al menos 2792.11 toneladas métricas de este residuo, siendo el equivalente al 1.05% de todos los residuos sólidos generados en la ciudad de El Alto. También se realizó una encuesta virtual para evaluar la percepción de los habitantes de la ciudad de El Alto concluyendo que una mayoría desconoce sobre las distintas formas de reciclaje de PET pero a la vez admite usar solo algunas veces este tipo de material en su diario vivir, lo cual concuerda con el dato numérico calculado, ya que si bien no es una cantidad despreciable al año, está lejos de estar entre los residuos sólidos más generados en la ciudad.
- Se desarrolló la práctica en laboratorio del reciclaje químico del PET por el método de solvólisis como opción para reciclar los envases PET en la ciudad de El Alto. Para ello se aplicó el método de hidrolisis de PET, el cual permite obtener ácido tereftalico de manera directa. Como parte de la hidrolisis, se realizaron sesiones experimentales para la hidrolisis neutra, básica y acida

de PET en las cuales se evaluaron 5 casos estudio de distintos envases PET que circulan en el mercado, tres transparentes y dos de color, para finalmente evaluar sus rendimientos de obtención de ácido tereftálico cuyos rangos se indican a continuación. Hidrolisis neutra: 8 - 16%; hidrolisis básica con agua como solvente: 33 - 46%, hidrolisis básica con etanol como solvente: 45 - 87% e hidrolisis ácida: 45 - 77%.

- Se determinó al método de solvolisis del PET más favorable y con mayor potencial para ser aplicado en la ciudad de El Alto. concluyendo que de todas las prácticas de hidrolisis realizadas, la que permitió obtener mayor cantidad de ácido tereftálico es la hidrolisis básica de PET con etanol como solvente, superando en 4 de los 5 casos estudio el 51% de rendimiento de la reacción para obtener ácido tereftálico, además de ser un proceso que no requiere trabajar a condiciones severas de operación (presión atmosférica y temperatura ambiente), ni de muchos reactivos peligrosos (se usa en mayor cantidad etanol), y no necesita de tiempos prolongados de degradación (el tiempo de degradación solo es de 40 - 50 minutos), demostrando ser la opción con mayor potencial de las estudiadas para reciclar químicamente los envases post consumo de polietileno de tereftalato.
- De las 20 pruebas de hidrolisis realizadas mediante diversos métodos (neutra, básica y ácida), solo en 7 se pudo obtener ácido tereftálico con un rendimiento mayor al 51%, validando en esos casos la hipótesis de investigación planteada en el capítulo 1, siendo el método de solvolisis por hidrolisis básica con etanol como solvente, el que obtuvo más del 51% de ácido en 4 de los 5 casos estudiados.
- El presente proyecto de investigación fue presentado en la VI Expo Ciencia Área de Ciencia y Tecnología 2022, ganando el primer lugar entre los proyectos presentados por la carrera de Ingeniería de Gas y Petroquímica y fue elegido para representar al área de Ciencia y Tecnología en la Feria Institucional de la UPEA - Versión X.

CAPITULO 6. RECOMENDACIONES

- El reciclaje químico del PET, es aún un área temática que necesita más investigación, ya que resulta ser el tipo de reciclaje que va más acorde a los principios de desarrollo sostenible y economía circular, sin embargo el gran problema que tiene es la rentabilidad. Tan solo analizando los costos de los reactivos, producir ácido tereftálico aun por el método más conveniente de hidrólisis, no justifica la inversión, los reactivos terminan costando al menos 10 veces más que el producto obtenido como tal. Es por ello que se necesitan más investigaciones y pruebas para disminuir los costos, o dirigir el enfoque a la recuperación de otros compuestos químicos de alto valor, como el dimetil tereftalato (DTM), el bis-hidroxi Etilen Tereftalato (BHET), entre otros.
- Como se indicó en conclusiones, la cantidad de residuos post consumo de polietileno de tereftalato en la ciudad de El Alto, está lejos de ser una de las mayores entre los residuos sólidos que se generan en la ciudad. De hecho considerando la cantidad de 2792.11 toneladas métricas de residuos PET al año como materia prima, representaría la obtención promedio de 1487.63 toneladas métricas de ácido tereftálico, una cantidad que va más acorde a la producción de una planta piloto.
- El reciclaje de residuos post consumo de polietileno de tereftalato, es sin duda un tema que puede estudiarse desde diversos ángulos, ya que involucra aspectos sociales importantes como la concientización e información de la sociedad con respecto a cómo deshecha su basura y que opciones tiene para reciclarla, así como en aspectos académicos como el estudio de nuevos métodos de reciclaje. Aún hay muchos tópicos relacionados que investigar y son de competencia de un Ingeniero Petroquímico, al tratarse de residuos poliméricos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ali, S., Elsamahy, T., Koutra, E., Kornaros, M., El-Sheekh, M., Abdelkarim, E., Sun, J. (2021). Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Sci. Total Environ.*
- Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. (2015). Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*, 53-64.
- Alto, G. g. (s.f.). *elaltobo.com*. Obtenido de <https://elaltobo.com/el-alto-poblacion-total-y-por-distritos/>
- Ashford's Dictionary of Industrial Chemicals. (2011). *Ashford's Dictionary of Industrial Chemicals* (Tercera ed.).
- Barrera, N. C. (2016). PROHIBICIÓN DEL USO DE BOLSA DE PLÁSTICO NAILON ANTE LA CONTAMINACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE. La Paz, Bolivia .
- Bartolome, L., Imran, M., Cho, B., Al-Masry, W., & Kim, D. (2012). Recent developments in the chemical recycling of PET, material recycling – trends and perspectives. *In Tech*.
- Bellis, M. (2020). The history of plastic. *About money*. Obtenido de <https://www.thoughtco.com/history-of-plastics-1992322>
- Blanco, M. (2006). *Principales Polimeros Comerciales*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.
- Centro de estudios y experimentacion de Obras Publicas (CEDEX). (Diciembre de 2013). *Reciclaje químico*. Obtenido de Residuos plásticos - Catálogo de residuos utilizables en construcción: www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/250/reciclaje-quimico.html
- Centro de noticias de la ONU. (25 de Septiembre de 2015). *Naciones Unidas*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Chaudhary, S., Surekha, P., Kumar, D., Rajagopal, C., & Roy, P. (2013). Microwave assisted glycolysis of poly(ethylene terephthalate) for preparation of polyester polyols. *Journal for Applied Polymer Science*.

- Chen, Y., Awasthi, A., Wei, F., Tan, Q., & Li, J. (2021). Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts. *PubMed*, 752.
- Chuquimia, L. (7 de Abril de 2019). Reciclar botellas PET, una forma sustentable de hacer negocios. *Página Siete*.
- Coorbeta, P. (2013). *Metodología y técnicas de investigación*.
- Das, A., & Mahanwar, P. (2020). A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res*, 93-101.
- de Sousa, F. (2021). Plastic and its consequences during the COVID-19 pandemic. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 46067-46078.
- Dirección de Gestión Integral de Residuos. (2022). *Composición de los Residuos Sólidos en la ciudad de El Alto*. Gobierno Municipal de la Ciudad de El Alto.
- Elgegren, M., Tiravanti, G., Ortiz, B., Otero, M., Wagner, F., Cerron, D., & Nakamatsu, J. (2012). *Reciclaje químico de Desechos Plásticos*. Lima - Peru: Revista de la Sociedad Química del Perú.
- Estévez, R. (16 de Noviembre de 2010). *Eco Inteligencia*. Obtenido de Eco Inteligencia: <https://www.ecointeligencia.com/2010/11/cuando-el-plastico-se-convierte-en-energia/>
- Francis, R. (2016). *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications*. John Wiley & Sons.
- GAMEA. (2017). *elaltobo.com*. Obtenido de <https://elaltobo.com/el-alto-poblacion-total-y-por-districtos/>
- GAMEA. (s.f.). *elaltobo.com*. Obtenido de <https://elaltobo.com/el-alto-poblacion-total-y-por-districtos/>
- Geyer, R., Jambeck, J., & Law, K. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *PubMed*, 3-8.
- Gilbert, M. (2017). *Plastics Materials: Introduction and Historical Development*. In *Brydson's Plastics Materials, 8th*, 2-18.
- Gobierno Autónomo Municipal de El Alto. (14 de Mayo de 2019). LEY DE MODIFICACIÓN A LA LEY MUNICIPAL N°361/16. El Alto.

- Guapisaca Siguenza, A. C., & Pintado Barbecho, F. A. (2019). *Valoración de Métodos Químicos para obtener Ácido Tereftálico a partir de Tereftalato de polietileno PET*. Cuenca - Ecuador: Universidad Politécnica Sede Cuenca.
- Instituto Mexicano de Plástico Industrial. (2000). *Enciclopedia del plástico Tomo II*. Mexico D.F.: I.M.P.I.
- Instituto Nacional de Estadística. (2012). *Censo Bolivia 2012*.
- Instituto Nacional de Estadística. (2022). *www.ine.gob.bo*. Obtenido de <https://www.ine.gob.bo/index.php/poblacion-de-el-alto-alcanza-a-mas-de-922-mil-habitantes/#:~:text=INE%20%E2%80%93%20El%20Alto%2C%20de,33%20aniversario%20de%20este%20municipio>.
- Jethy, B., Paul, S., Das, S., Adesina, A., & Mustakim, S. (2022). Critical review on the evolution, properties, and utilization of plasticwastes for construction applications. *Cycles Waste Manag*, 435-451.
- Kabasci, S. (2014). *Bio-Based Plastics Materials and Applications*. Hoboken.
- Karayannidis, G., & Achilias, D. (2007). Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate). *Macromol. Mater. Eng*, 128-146.
- Korzeniowski, A. S. (1996). *Packaging in Logistic systems, Instytut Logistyki i Magazynowania*. Poznan, Polish.
- Kotiba, H., Mosab, K., & Fawa, D. (2013). Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. *Science Direct*, 2801-2812.
- Lopez Barajas, F. (2014). *Estudio del efecto del procesamiento y la extensión de cadena sobre las propiedades reológicas y mecánicas de PET. Una alternativa al reciclado*. Saltillo, Coahuila.
- Madriz, J. L. (2015). *metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2012). *Guía de educación ambiental en la gestión integral de residuos sólidos*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2020). *Generación de Residuos Sólidos a Nivel Nacional*. La Paz.
- Miranda Novales, M. G., & Villasís Keever, M. Á. (2016). *El protocolo de investigación IV: las variables de estudio*. Mexico D.F.: Revista Alergia Mexico.

- Mittal, M., Mittal, D., & Aggarwal, N. (2022). Plastic accumulation during COVID-19: Call for another pandemic; bioplastic a step towards this challenge? *Environ. Sci. Pollut. Res*, 11039-11052.
- Morales Palomino, J. (2010). *Proceso de recuperación del ácido tereftálico y el etilenglicol del PET reciclado*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Morales Salgueiro, J. H. (2014). *Diseño de una maquina extrusora de plásticos PET*. La Paz: Universidad Mayor de San Andres.
- Nagalakshmaiah, M., Afrin, S., Malladi, R., Elkoun, S., Robert, M., Ansari, M., . . . Karim, Z. (2019). Biocomposites: Present trends and challenges for the future. *Woodhead*, 197-215.
- Nahoum, C. (2015). *El proceso de la Investigación*.
- Patzi Canaza, G. (2015). *Estudio de un Proceso tecnológico para el reciclaje de botellas PET*. La Paz: Universidad Mayor de San Andres.
- Perdigon, Y. (2010). *Tipos de Reciclaje - Todo lo que debe saber*. Obtenido de Infinita Naturaleza: <https://infinitanaturaleza.com/medio-ambiente/tipos-de-reciclaje/>
- Pinos, J. A. (2019). Valoración de métodos químicos para obtener ácido tereftálico de polietileno pet.
- Plastivida Argentina. (2009). *Recuperacion Energetica de los Residuos Plasticos*. Buenos Aires: Centro de Informacion Tecnica - CIT.
- Ramkumar, M., Balasubramani, K., Santosh, M., & Nagarajan, R. (2021). The plastisphere: A morphometric genetic classification of plastic pollutants in the natural environment. *Gondwana Res*.
- Ramos, A. H. (2012). *Metodologia de la investigación científica* .
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología De La Investigación* .
- Scientific, T. (2020). Ficha Acido Tereftálico .
- Seymour, T. (2013). *Process for the preparation of polyesters with high recycle content*.
- Shackerlford, J. F. (2011). *Introduccion a la Ciencia de los Materiales para la Ingenieria*. Madrid: Pearson-Prentice Hall.

- Sheehan, R. J. (1985). Terephthalic Acid, Dimethyl Terephthalate, and Isophthalic Acid. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.
- Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Compos. Part B Eng.*(115), 409–422.
- Sinha, V., & Patel, M. P. (2010). Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*(18), 8-25.
- Suasnavas Flores, D. F. (2017). *Degradación de materiales plásticos "PET" (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Tarqui Zabala, N. (2014). *Modelo de planta recicladora de botellas PET ciudad de El Alto*. La Paz.
- The European Chemicals Agency. (Agosto de 2021). Chemical Recycling of Polymeric Materials from Waste in Circular Economy. Obtenido de https://echa.europa.eu/documents/10162/1459379/chem_recycling_final_report_en.pdf/887c4182-8327-e197-0bc4-17a5d608de6e
- Usquiano Marquez, S. L., Siñani Chavez, R., & Quispe Alejo, L. (2021). *Sistema de Reciclaje a partir de residuos post - consumo de tereftalato de polietileno en la zona de Villa Ingenio*. El Alto.
- Vargas Santillán, A. (2019). *Análisis de Reciclado Químico de Plásticos (PE y PET) para la obtención de Productos con Valor Agregado en México*. Michoacan - Mexico: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Visakh, P., & Liang, M. (2015). *Poli (Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites*.
- W. P. Luo, X. Y. (2017). *Oxidación aeróbica de ácido p-toluico a ácido tereftálico sobre T(p-Cl)PPMnCl/Co(OAc)₂ en condiciones moderadas*. Estados Unidos
- Yustos, L. H. (2008). *Aplicación de nuevas tecnologías en la realización de herramientas para moldes de inyección de termoplásticos*. Madrid.

ANEXOS

ANEXO 1

REGISTRO SENAPI



**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-2966/2022
La Paz, 13 de Diciembre del 2022**



VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha 8 de Diciembre del 2022, por **NICOLÁS QUENTA TICONA**, con C.I. N° 2342704 LP, con número de trámite **DA 1382/2022**, señala la pretensión de inscripción de la Compilación de Obras Escritas titulada: **"PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN UPEA GESTIÓN 2022 - INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA DE GAS Y PETROQUÍMICA"**, conformada por las Obras Escritas: **"PRODUCCIÓN DE ANTICORROSIVO A PARTIR DE RESIDUOS DE CÍTRICOS PARA LA ALIMENTACIÓN DE REDES PRIMARIAS DE GAS NATURAL EN LA CIUDAD DE EL ALTO"**, **"OBTENCIÓN DE ÁCIDO TEREFTÁLICO POR SOLVOLISIS A PARTIR DE POLIETILENO DE TEREFALATO EN LA CIUDAD DE EL ALTO"**, **"PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE TUBÉRCULOS PARA AUMENTAR EL OCTANAJE DE LA GASOLINA EN LA CIUDAD DE EL ALTO"** y **"PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS POR EL PROCESO DE PIRÓLISIS A PARTIR DE MEZCLAS POLIMÉRICAS POST-CONSUMO EN LA CIUDAD DE EL ALTO"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en los Formularios de Solicitud, documentación que tiene la calidad de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

**"2022 AÑO DE LA REVOLUCIÓN CULTURAL PARA LA DESPATRIARCALIZACIÓN:
POR UNA VIDA LIBRE DE VIOLENCIA CONTRA LAS MUJERES"**



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, No 575,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani,
Telfs.: 2115700 - 2119276
2119251 Fax: 2115700

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijano,
N° 25, Edif. Bicentenario,
Telfs.: 312752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Chuquisaca, N° 649,
Piso 2, entre Arce y Lanza
zona Central - Noroeste,
Telfs.: 4404403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
ltda. Piso 2, Of. 38,
zona 15 de Julio,
Telfs.: 2141001 - 72042009

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
casi esq. Urrutiasola,
zona Parque Bolívar,
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Calle Ingavi, N° 385
entre Santa Cruz
y Mónde, zona
La Pampa,
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
N° 5897, entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 14 (Ex Banco Fie),
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Albo y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 17.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*.

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*.

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ..."*, por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Obras Escritas de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, la Compilación de Obras Escritas titulada: **"PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN UPEA GESTIÓN 2022 - INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA DE GAS Y PETROQUÍMICA"**, conformada por:

- **"PRODUCCIÓN DE ANTICORROSIVO A PARTIR DE RESIDUOS DE CÍTRICOS PARA LA ALIMENTACIÓN DE REDES PRIMARIAS DE GAS NATURAL EN LA CIUDAD DE EL ALTO"**, a favor de los autores: **RUDDY SIMÓN MACHICADO OSCO** con C.I. Nº 4291617 LP, **ANA CAROLA CHURA BALTAZAR** con C.I. Nº 1769093 PD y **MERY MAMANI CALLIZAYA** con C.I. Nº 9129953 LP y como titular derivado: **INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA DE GAS Y PETROQUÍMICA, UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO - UPEA**, con NIT Nº 122025022, representado legalmente por **CARLOS CONDORI TITIRICO**.
- **"OBTENCIÓN DE ÁCIDO TEREFTÁLICO POR SOLVOLISIS A PARTIR DE POLIETILENO DE TEREFTALATO EN LA CIUDAD DE EL ALTO"**, a favor de los autores: **STEFFI LAURA USQUIANO MARQUEZ** con C.I. Nº 6923742 LP, **HEBERT HILARI PACOSILLO** con C.I. Nº 9953502 LP y **RICHARD RUBEN LUQUE POMA** con C.I. Nº 9103862 LP y como titular derivado: **INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA DE GAS Y PETROQUÍMICA, UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO - UPEA** con NIT Nº 122025022, representado legalmente por **CARLOS CONDORI TITIRICO**.
- **"PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE TUBÉRCULOS PARA AUMENTAR EL OCTANAJE DE LA GASOLINA EN LA CIUDAD DE EL ALTO"**, a favor de los autores: **ELMA ROCIO CORDOVA QUISPE** con C.I. Nº 4287743 LP, **HECTOR RAMIRO MORALES FERNANDEZ** con C.I. Nº 8366229 LP y **LOLA ESTELA MALDONADO MAMANI** con C.I. Nº 7093609 LP y como titular

**"2022 AÑO DE LA REVOLUCIÓN CULTURAL PARA LA DESPATRIARCALIZACIÓN:
POR UNA VIDA LIBRE DE VIOLENCIA CONTRA LAS MUJERES"**



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, No 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani,
Telfs.: 2195700 - 2199276
2192551 Fax: 2195700

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijano,
Nº 29, Edif. Bicentenario,
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Chuquisaca, Nº 649,
Piso 2, entre Antezana y Lanza
zona Central - Moreste,
Telfs.: 6141403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, Nº 2550-
Edif. Multicentro El Ceibo
Lda. Piso 2, Of. 5B,
zona 16 de Julio,
Telfs.: 2191001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca
Calle Villomero 7, Nº 366
casi esq. Urdinogottin,
zona Parque Belívar,
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Calle Ingeral, Nº 385
entre Santa Cruz
y Méndez, zona
La Pampa,
Telf.: 72095206

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
Nº 5877, entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 34 (Ex Banco Fie).
Telf.: 67201288



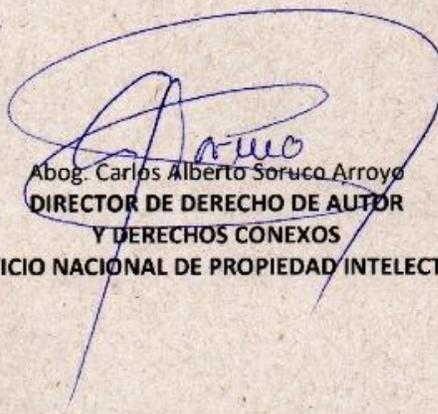
Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas Nº 262,
Primer Piso, Of. 17.

derivado: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA DE GAS Y PETROQUÍMICA, UNIVERSIDAD PUBLICA DE EL ALTO - UPEA, con NIT N° 122025022, representado legalmente por CARLOS CONDORI TITIRICO.

- "PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS POR EL PROCESO DE PIRÓLISIS A PARTIR DE MEZCLAS POLIMÉRICAS POST-CONSUMO EN LA CIUDAD DE EL ALTO", a favor de los autores: ANA LUISA PARI TICONA con C.I. N° 6753005 LP, bajo el seudónimo ANA LUISA, ANA GABRIELA APAZA MAMANI con C.I. N° 9910420 LP y NOEMI MAMANI CHOQUE con C.I. N° 9250147 LP y como titular derivado: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA DE GAS Y PETROQUÍMICA, UNIVERSIDAD PUBLICA DE EL ALTO - UPEA con NIT N° 122025022, representado legalmente por CARLOS CONDORI TITIRICO.

Quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.



Abog. Carlos Alberto Soruco Arroyo
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS**
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL



CASA/osmb
c.c.Arch.



**"2022 AÑO DE LA REVOLUCIÓN CULTURAL PARA LA DESPATRIARCALIZACIÓN:
POR UNA VIDA LIBRE DE VIOLENCIA CONTRA LAS MUJERES"**



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, No 915,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Telfs.: 2195700 - 2199276
219251 Fax: 2195700

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 322752 - 32042936

Oficina - Cochabamba
Calle Chuquisaca, N° 649,
Piso 2, entre Antezana y Lanza
zona Central - Noroeste.
Telfs.: 4344403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 5B,
zona 16 de Julio.
Telfs.: 2194001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
caso esq. Urriolagoitia,
zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Calle Ingavi, N° 385
entre Santa Cruz
y Méndez, zona
La Pompa.
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
N° 5837, entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 14 (Ex Banco Fie).
Telf.: 6720288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 262,
Primer Piso, Of. 17.

ANEXO 2

**CALCULOS REALIZADOS EN LA
INVESTIGACIÓN**

CALCULOS PARA PREPARAR LA SOLUCION DE ACIDO SULFURICO AL 2 MOLAR

Para preparar una solución de 10 ml de H₂SO₄ de 2M, se tuvieron que realizar los siguientes cálculos conociendo la siguiente información.

- Volumen solución: 10ml
- Concentración solución concentrada comercial de H₂SO₄ : 98%
- Densidad solución concentrada comercial H₂SO₄: 1.84g/ml
- Peso molecular H₂SO₄: 98 g/mol

Se sabe que la molaridad tiene la siguiente ecuación:

Ecuación para cálculo de Molaridad

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{moles de soluto}}{1 \text{ litro solución}}$$

Entonces una solución de H₂SO₄ al 2M, se puede representar de la siguiente forma:

$$2M = \frac{2 \text{ moles } H_2SO_4}{1 \text{ litro solución}} = \frac{2 \text{ moles } H_2SO_4}{1000 \text{ ml solución}}$$

Conociendo la densidad, concentración en peso y el peso molecular de la solución concentrada comercial de H₂SO₄ adquirida al 98%, se procede a realizar los cálculos para generar una solución de 10 ml a 2M de H₂SO₄:

$$10 \text{ ml solución} * \frac{2 \text{ moles } H_2SO_4}{1000 \text{ ml solución}} * \frac{98 \text{ g } H_2SO_4}{1 \text{ mol } H_2SO_4} * \frac{100 \text{ g s.c. } H_2SO_4}{98 \text{ g } H_2SO_4} \\ * \frac{1 \text{ ml s.c. } H_2SO_4}{1.84 \text{ g s.c. } H_2SO_4} = 1.09 \text{ ml s.c. } H_2SO_4$$

CALCULOS PARA PREPARAR LA SOLUCION DE ACIDO SULFURICO AL 7.5 MOLAR

Para preparar una solución de 10 ml de H_2SO_4 de 7.5 M, se tuvieron que realizar los siguientes cálculos conociendo la siguiente información.

- Volumen solución: 10ml
- Concentración solución concentrada comercial de H_2SO_4 : 98%
- Densidad solución concentrada comercial H_2SO_4 : 1.84g/ml
- Peso molecular H_2SO_4 : 98 g/mol

Se sabe que la molaridad por la ecuación 4.1, y en este caso, una solución de H_2SO_4 al 7.5 M, se puede representar de la siguiente forma:

$$7.5M = \frac{7.5 \text{ moles } H_2SO_4}{1 \text{ litro solución}} = \frac{7.5 \text{ moles } H_2SO_4}{1000 \text{ ml solución}}$$

Conociendo la densidad, concentración en peso y el peso molecular de la solución concentrada comercial de H_2SO_4 adquirida al 98%, se procede a realizar los cálculos para generar una solución de 10 ml a 7.5M de H_2SO_4 :

$$10 \text{ ml solución} * \frac{7.5 \text{ moles } H_2SO_4}{1000 \text{ ml solución}} * \frac{98 \text{ g } H_2SO_4}{1 \text{ mol } H_2SO_4} * \frac{100 \text{ g s.c. } H_2SO_4}{98 \text{ g } H_2SO_4} \\ * \frac{1 \text{ ml s.c. } H_2SO_4}{1.84 \text{ g s.c. } H_2SO_4} = 4.08 \text{ ml s.c. } H_2SO_4$$

De los cálculos se conoce que será necesario diluir 4.08 ml de solución concentrada de H_2SO_4 al 98% para preparar 10 ml de solución.

CALCULOS PARA PREPARAR LA SOLUCION DE HDRÓXIDO DE SODIO AL 5 MOLAR

Para preparar una solución de 5 ml de NaOH de 5 M, se tuvieron que realizar los siguientes cálculos conociendo la siguiente información.

- Volumen solución: 5ml
- Peso molecular NaOH: 40 g/mol

Se sabe que la molaridad por la ecuación 4.1, y en este caso, una solución de NaOH al 5M, se puede representar de la siguiente forma:

$$5M = \frac{5 \text{ moles NaOH}}{1 \text{ litro solución}} = \frac{5 \text{ moles NaOH}}{1000 \text{ ml solución}}$$

Conociendo el peso molecular de NaOH, se procede a realizar los cálculos para generar una solución de 5 ml a 5M de NaOH:

$$5 \text{ ml solución} * \frac{5 \text{ moles NaOH}}{1000 \text{ ml solución}} * \frac{40 \text{ g NaOH}}{1 \text{ mol NaOH}} = 1 \text{ g de NaOH}$$