

**PROPUESTA DE UNA ALTERNATIVA DE RECICLAJE PARA ENVASES DE BEBIDA
DE PLÁSTICO PET POS CONSUMO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ**

PAULA SOFÍA OLIVEROS SALINAS

JHON ALEXANDER VARGAS CIFUENTES

Proyecto integral de grado para optar el título de
Ingeniero Químico

Orientador

Felipe Correa Mahecha

Ingeniero Químico

Msc Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ. D.C.

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre: Felipe Correa Mahecha

Firma del director

Nombre: Luis Alberto Figueroa

Firma del Jurado

Nombre: Dany José Cárdenas

Firma del Jurado

Bogotá D.C., julio del 2021.

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro:

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA.

Consejero Institucional:

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA.

Vicerrectora Académica y de Investigación:

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMAN

Vicerrector Administrativo y Financiero:

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General:

Dr. JOSE LUIS MACIAS RODRIGUEZ

Decano Facultad de Ingenierías:

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI.

Director Programa Ingeniería Química:

Dra. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza necesaria y nunca soltarme de su mano para seguir adelante a pesar de las dificultades que se me presentaron en este camino.

A mi madre Sandra Bibiana Salinas Parra por brindarme su apoyo incondicional, por creer tanto en mí y darme ánimos para no rendirme en este camino lleno de retos, gracias a ella soy la persona que soy.

A mi padre Paulo Antonio Oliveros Peña por siempre creer que era la mejor para él y por nunca dudar de mí.

A mi abuela María Ofelia Parra que, aunque hoy se encuentre en el cielo se lo dedico por siempre estar para mí y quererme como una hija, sin su apoyo no hubiera sido posible mi educación.

A mi abuelo Ciro Antonio Salinas, por siempre brindarnos a mi mamá y a mí un hogar sin recibir nada a cambio.

A mi novio Juan Camilo Estepa por su paciencia y acompañamiento en este camino por que fue testigo de mis lágrimas y angustia.

A mi compañero Jhon Alexander Vargas Cifuentes por su compromiso y apoyo, sin su trabajo no hubiera logrado el desarrollo de este proyecto.

PAULA SOFÍA OLIVEROS SALINAS

La finalización de esta etapa de mi vida refleja en este logro el esfuerzo y dedicación que he puesto en el camino que he recorrido para llegar a este punto. Quiero dedicar este pequeño paso que he logrado en mi vida:

En primera instancia a Dios, por brindarme la salud, fuerza y energía en esta realidad actual, necesarias para la culminación de este proyecto.

A mi madre Dora María Cifuentes, Por apoyarme incondicionalmente, preocuparse por mi bienestar y acompañarme en tantas traspasadas vividas a lo largo de este arduo proceso. Igualmente, por ser la persona que más amo en este mundo y la fiel testigo de todos mis éxitos y fracasos a lo largo de este camino.

A mi padre José Guillermo Vargas por darme la oportunidad, el apoyo y los ánimos para estudiar esta maravillosa pero demandante carrera universitaria.

A mi hermano Johan David Vargas por ser ese fiel consejero y compinche mío, a lo largo de este camino. También por brindarme su alegría y entusiasmo en los momentos que más lo requería.

A mi compañera Paula Sofía Oliveros Salinas, por su gran ayuda y disciplina en la elaboración de este proyecto investigativo, pero sobre todo por su gran liderazgo y paciencia frente a las adversidades.

A mis compañeros de carrera y profesores, por su gran carisma y actitud, por las enseñanzas aprendidas y todo lo demás.

A todos ellos, por todo el amor compartido, enseñanzas aprendidas, momentos disfrutados y todo lo demás que se escapa a estas letras, a ustedes les dedico esto.

JHON ALEXANDER VARGAS CIFUENTES

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios por darnos la fuerza, salud, paciencia y energía necesaria para culminar esta gran etapa de nuestras vidas, permitiéndonos forjar una buena amistad, desarrollo personal y profesional.

A nuestros padres y familiares, quienes siempre nos acompañaron y respaldaron a lo largo de todo este proceso.

A nuestro orientador el Ingeniero y Magister Felipe Correa Mahecha por su colaboración, paciencia, ayuda y dedicación aún en la lejanía a lo largo del proyecto.

Al personal de sistemas de la Fundación Universidad de América, por la colaboración en las herramientas digitales brindadas.

A todos los profesores y educadores que nos formaron y acompañaron a lo largo de este camino.

A los demás amigos y colaboradores que nos permitieron desarrollar y culminar este proyecto.

PAULA SOFÍA OLIVEROS SALINAS

JHON ALEXANDER VARGAS CIFUENTES

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	17
INTRODUCCIÓN	18
1. GENERALIDADES	21
1.1 Alternativas de reciclaje del PET	21
1.2 Mercado del PET en Colombia y el mundo	24
1.3 Marco conceptual	27
1.4 Marco legal	28
2. CARACTERIZACIÓN PLÁSTICO PET POSCONSUMO	31
2.1 Generalidades Residuos Sólidos De Bogotá	32
<i>2.1.1 Actualidad reciclaje de plástico PET en Bogotá</i>	34
2.2 Caracterización de envase PET posconsumo	37
<i>2.2.1 Acondicionamiento del envase</i>	41
2.3 Composición química envases PET	43
3. SELECCIÓN DEL PROCESO DE RECICLAJE	45
3.1 Criterios de selección para el proceso de reciclaje.	46
<i>3.1.1 Contaminación</i>	46
<i>3.1.2 Consumo de energía</i>	46
<i>3.1.3 Pasos del proceso</i>	46
<i>3.1.4 Productos generados</i>	47
<i>3.1.5 Aplicabilidad industrial</i>	47
3.2 Alternativas utilizadas de reciclaje químico para el estudio.	48
<i>3.2.1 Pirolisis</i>	48
<i>3.2.2 Gasificación</i>	50
<i>3.2.3 Incineración</i>	52
<i>3.2.4 Hidrólisis</i>	54
<i>3.2.5 Metanólisis</i>	56
<i>3.2.6 Glicólisis</i>	58
3.3 Matriz evaluación de proceso	60
<i>3.3.1 Desarrollo de la matriz</i>	61

3.3.2 Pesos de los criterios	63
3.3.3. Valorización a cada alternativa	67
3.4 Análisis de los resultados obtenidos	69
3.5 Potencial económico alternativa seleccionada	70
4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE RECICLAJE GLICOLISIS	73
4.1 Metodología para el diseño conceptual del proceso	73
4.1.1 Nivel 1: Discontinuo vs. Continuo	73
4.1.2 Nivel 2: Estructura de entradas y salidas	75
4.1.3 Nivel 3: Estructura de recirculados	76
4.1.4 Nivel 4 Especificación del sistema de Separación.	78
4.1.5 Nivel 5. Red de intercambio calórico.	79
4.2 Explicación técnica del proceso	80
4.3 Criterios de diseño	81
4.3.1 Tipo de catalizador	81
4.3.2 Cantidad de agua necesaria para la extracción y cristalización	82
4.3.3 Efecto del tiempo y la temperatura	83
4.3.4 Tamaño de partícula	84
4.4 Balance de materia y energía	84
4.4.1 Balance de materia	84
4.4.2 Balance de energía	88
4.5 Dimensionamiento de equipos	90
4.5.1 Metodología utilizada en aspen plus	90
4.5.2 Diseño del equipo reactor R-101	91
4.5.3 Diseño de los intercambiadores E-203, E-201 Y E-402	95
4.5.4 Diseño del mezclador M-201	99
4.5.5 Diseño del Filtrador F-301	101
4.5.6 Diseño del Cristalizador CR-501	103
4.5.7 Diseño Torre de destilación D-601	105
4.5.8 Diseño de la centrifuga C-501	108
4.5.9 Esquema del proceso de Glicolisis del PET en Aspen Plus	111
5. ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROCESO DE GLICOLISIS DEL PET	112

5.1 Funcionamiento del módulo APEA	112
5.2 Estimación de los costos de los equipos	113
5.3 Estimación de los costos de las utilidades	114
6. CONCLUSIONES	116
BIBLIOGRAFÍA	118
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Distribución de los residuos aprovechados en Bogotá 2017	33
Figura 2. Reporte tipos de residuos aprovechados en Bogotá 2017	33
Figura 3. Material plástico posconsumo transformado por empresas de Bogotá. 2019	35
Figura 4. Generación de residuos PET en Bogotá, hasta el 2014	36
Figura 5. Proyección demanda insatisfecha de resina PET en Bogotá	37
Figura 6. Distribución de desechos plásticos en Bogotá, 2013	38
Figura 7. Acondicionamiento botella plástica PET posconsumo	42
Figura 8. Diagrama de producción de la resina PET	44
Figura 9. Diagrama del proceso de pirólisis	50
Figura 10. Diagrama del proceso de gasificación	52
Figura 11. Diagrama del proceso de incineración	54
Figura 12. Diagrama del proceso de hidrólisis	56
Figura 13. Diagrama del proceso de metanólisis	58
Figura 14. Diagrama del proceso de glicólisis	60
Figura 15. Bosquejo del problema con sus posibles soluciones y criterios	62
Figura 16. Pesos de los criterios obtenidos	64
Figura 17. Pesos de las alternativas	68
Figura 18. Reacción de Glicólisis de PET	76
Figura 19. Resultados obtenidos del simulador aspen V9	89
Figura 20. Dibujo del reactor de glicólisis del PET	94
Figura 21. Dibujo de los intercambiadores HeatX	97
Figura 22. Dibujo del Mezclador de glicólisis del PET	100
Figura 23. Dibujo del Filtrador F-301	102
Figura 24. Dibujo del Cristalizador CR-501.	105
Figura 25. Diagrama de simulación torres de destilación D-601	106
Figura 26. Dibujo de la centrifuga C-501	109
Figura 27. Cantidad de agua utilizada para extracción y cristalización	151
Figura 28. Conversión del PET a través del tiempo	152
Figura 29. Porcentaje de Peso del BHET al aumentar temperatura	153
Figura 30. Porcentaje de rendimiento del BHET para diferentes tamaños de partícula	153
Figura 31. Componentes ingresados al simulador ASPEN PLUS	154
Figura 32. Modelo termodinámico utilizado en ASPEN PLUS	155
Figura 33. Bases de datos utilizadas en ASPEN PLUS..	155
Figura 34. Relación de la ecuación de van't hoff con la constante de equilibrio.	156
Figura 35. La ecuación de Arrhenius con la constante de la reacción directa	157
Figura 36. La ecuación de Arrhenius con la constante de la reacción inversa.	157
Figura 37. Constantes de velocidad para diferentes cantidades de catalizador y PET con diferentes temperaturas	159
Figura 38. Datos cinéticos de la reacción directa para la simulación del reactor en Aspen Plus	160
Figura 39. Datos cinéticos de la reacción inversa para la simulación del reactor en Aspen	160
Figura 40. Condiciones de operación de la reacción	161

Figura 41. Tiempo de operación de la reacción	161
Figura 42. Dimensiones del reactor.	162
Figura 43. Dimensiones del intercambiador de calor E-203	163
Figura 44. Requerimientos del intercambiador de calor E-203	164
Figura 45. Especificaciones ingresadas del Intercambiador de calor E-201	165
Figura 46. Dimensiones del intercambiador de calor E-201	166
Figura 47. Dimensiones del intercambiador de calor E-201	167
Figura 48. Especificaciones ingresadas del Intercambiador de calor E-402	168
Figura 49. Dimensiones del intercambiador de calor E-402	169
Figura 50. Dimensiones del intercambiador de calor E-402	170
Figura 51. Requerimientos cumplidos de los intercambiadores en el módulo EDR	170
Figura 52. Especificaciones ingresadas al mezclador M-201	171
Figura 53. Dimensiones del mezclador	172
Figura 54. Especificaciones ingresadas del filtro F-301	173
Figura 55. Dimensiones del filtro F-301	173
Figura 56. Gráfica de solubilidad BHET/H ₂ O	174
Figura 57. Especificaciones de entrada ingresadas en el bloque “Crystallizer”	175
Figura 58. Dimensionamiento obtenido del cristalizador CR-501	176
Figura 59. Especificaciones de entrada equipo D-601 (bloque DSTWU)	177
Figura 60. Resultados especificaciones de diseño equipo D-601 (bloque DSTWU)	178
Figura 61. Especificaciones de entrada equipo D-601 (bloque RAD-FRAC)	178
Figura 62. Gráfico equilibrio liquido -vapor tipo T-xy de la mezcla H ₂ O/EG	180
Figura 63. Especificaciones de entrada ingresadas en el bloque “CFUGE” C-501	181
Figura 64. Proporciones obtenidas en el dimensionamiento de la canasta para la C-501	182
Figura 65. Dimensionamiento obtenido de la centrifuga C-501	182
Figura 66. Costo de las utilidades que existen en aspen plus	183
Figura 67. Costo de los equipos utilizados en el proceso de glicolisis	183
Figura 68. Grafica ajuste precio equipos diseñados con acero al carbono.	184
Figura 69. Grafica ajuste precio equipos diseñados con acero inoxidable 304.	184
Figura 70. Bibliometrías estudiadas y realizadas mediante el software bibliometrix	185

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Precio del residuo PET en Colombia.	27
Tabla 2. Marco legal gestión de residuos sólidos	29
Tabla 3. Volumen (ton/día) desechos plásticos en rellenos sanitarios, Bogotá 2013	39
Tabla 4. Caracterización de los residuos plásticos en Bogotá, 2018	39
Tabla 5. Criterios de proceso	47
Tabla 6. Productos del proceso de pirólisis	48
Tabla 7. Precios productos del proceso de Hidrólisis	55
Tabla 8. Escala de valor de Saaty	62
Tabla 9. Matriz A: valorización de criterios	63
Tabla 10. Matriz B: Normalización pesos de criterios	64
Tabla 11. Pesos de las alternativas estudiadas	68
Tabla 12. Potencial económico alternativas reciclaje químico del PET	71
Tabla 13. Capacidad Instalada de diferentes empresas de Glicólisis	74
Tabla 14. Estrategia de separación y recuperación de Etilenglicol	79
Tabla 15. Resultados obtenidos balance de energía	89
Tabla 16. Resultados Bibliográficos balance de energía	90
Tabla 17. Condiciones de operación para el reactor	92
Tabla 18. Parámetros cinéticos	93
Tabla 19. Dimensiones del reactor	94
Tabla 20. Referentes bibliográficos dimensiones de reactor	95
Tabla 21. Resultados de los intercambiadores simulados en aspen	98
Tabla 22. Resultados de los intercambiadores de referentes bibliográficos	98
Tabla 23. Dimensiones del mezclador M-201	100
Tabla 24. Dimensiones del mezclador del referente	101
Tabla 25. Dimensiones del filtrador F-301	103
Tabla 26. Condiciones de operación Cristalizador CR-501	104
Tabla 27. Dimensionamiento y comparación del Cristalizador CR-501	105
Tabla 28. Especificaciones de diseño Bloque D-601 (RAD-FRAC)	107
Tabla 29. Dimensionamiento obtenido torre de destilación RAD-FRAC	107
Tabla 30. Comparación dimensionamiento torre destilación con referentes bibliográficos	108
Tabla 31. Dimensiones calculadas de la canasta equipo centrifuga C-501	109
Tabla 32. Comparación Dimensionamiento Centrifugas	110
Tabla 33. Costos de Equipos empleando Aspen (APEA)	114
Tabla 34. Costos de utilidades empleando Aspen (APEA)	115
Tabla 35. Ejemplo uno asignación y valorización de criterios	141
Tabla 36. Ejemplo dos asignación y valorización de criterios	141
Tabla 37. Ejemplo tres asignación y valorización de criterios	142
Tabla 38. Ejemplo cuatro asignación y valorización de criterios	143
Tabla 39. Asignación y suma de criterios	143
Tabla 40. Resultados de valorización de los criterios	144
Tabla 41. Criterio de energía evaluado para las alternativas	145
Tabla 42. Normalización matriz energía	146

Tabla 43. Criterio contaminación evaluado para las alternativas	146
Tabla 44. Normalización matriz contaminación	146
Tabla 45. Criterio de valor producto evaluado para las alternativas	147
Tabla 46. Normalización matriz valor de producto	147
Tabla 47. Criterio de aplicabilidad industrial evaluado para las alternativas	147
Tabla 48. Normalización matriz aplicabilidad industrial	148
Tabla 49. Criterio de pasos del proceso evaluado para las alternativas	148
Tabla 50. Normalización matriz pasos del proceso	149
Tabla 51. Datos cinéticos para la glicolisis del PET con carbonato de sodio	156
Tabla 52. Relaciones típicas para el diseño de un agitador	171

ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Explicación de la valorización de los criterios	140
Anexo 2. Desarrollo de la valorización de las alternativas respecto a cada criterio	145
Anexo 3. Diagrama de bloques y diagrama de flujo PFD	149
Anexo 4. Representaciones graficas de las condiciones de operación para la glicólisis	151
Anexo 5. Ilustraciones de las especificaciones dadas en aspen plus para la simulación de la glicólisis del PET	154
Anexo 6. Datos cinéticos tomados de un artículo para la obtención de la energía de activación y la entalpía de reacción	156
Anexo 7. Ecuaciones y graficas de la cinética de la reacción de glicolisis del PET	158
Anexo 8. Ilustraciones de las dimensiones especificaciones en aspen plus para el reactor batch	160
Anexo 9. Ilustraciones de las dimensiones y especificaciones en aspen plus para los intercambiadores	163
Anexo 10. Ilustraciones de las dimensiones y especificaciones en aspen plus para el mezclador	171
Anexo 11. Ilustraciones de las dimensiones y especificaciones en aspen plus para el filtro	173
Anexo 12. Especificaciones y dimensionamiento en aspen plus del cristalizador	174
Anexo 13. Especificaciones y dimensionamiento del equipo D-601	177
Anexo 14. Especificaciones y dimensionamiento equipo centrifuga C-501	181
Anexo 15. Ilustración de los costos de las utilidades en Aspen Plus	183
Anexo 16. Gráficas: ajuste de costos de los equipos en periodos (2015-2021)	184
Anexo 17. Ilustración de las bibliometrías	185
Anexo 18. Recomendaciones	186

LISTA DE ABREVIATURAS

SUI:	Sistema único de información de servicios públicos
PET:	Tereftalato de polietileno
UAESP:	Unidad administrativa especial de servicios públicos de Bogotá
DANE:	Departamento administrativo nacional de estadística
MADS:	Ministerio de ambiente desarrollo sostenible
ODS:	Objetivos de desarrollo sostenible
ton/mes:	Toneladas/mes
ton/dia:	Toneladas/ día
ton/año:	Toneladas/ año
EG:	Etilenglicol
BHET:	Tereftalato de bis (2-hidroxietilo)

RESUMEN

El objetivo principal de este documento es proponer una alternativa de reciclaje para envases posconsumo fabricados a partir de la resina plástica PET, en la ciudad de Bogotá, debido a que la actividad actual de reciclaje de esta resina no satisface la cantidad ni el tipo de desechos PET generados en Bogotá. Por lo anterior, se realizó inicialmente un estudio y acercamiento a las alternativas de reciclaje actuales empleadas internacionalmente, posterior a ello, se ejecutó una caracterización de los desechos plásticos PET generados en Bogotá, se procedió a evaluar y seleccionar un proceso de reciclaje de acuerdo con criterios previamente establecidos. A continuación, se realizaron especificaciones técnicas del proceso incluyendo condiciones de operación, materias primas, equipos y su dimensionamiento básico; finalmente se efectuó un costeo preliminar de equipos y utilidades en el proceso de reciclaje propuesto.

PALABRAS CLAVE: Reciclaje, Desechos, PET, Gestión ambiental, Economía circular, Proceso Químico

INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo de la industria alimenticia ha permitido ampliar las formas de ingesta de los alimentos necesarios para la humanidad, esto ha conllevado a un crecimiento exponencial de envases y empaques, fabricados de diferentes materiales tales como: aluminio, papel, vidrio, plástico, entre otros; siendo elaborados con la limitación de un solo uso en su gran mayoría. Es así, que la constante acumulación de dichos residuos por la humanidad, ha generado problemas de contaminación de toda índole, un ejemplo de ello, es el agotamiento de recursos naturales, la contaminación de mares y suelos, el cambio climático y problemas socioeconómicos.

En la actualidad, el PET es uno de los plásticos más usados en el mundo, siendo 100% reciclable y aprovechable, no obstante, en países como Colombia con escasa educación relacionada en actividades de reciclaje, este residuo se convierte en un problema de contaminación. En el país, actualmente se genera aproximadamente 12 millones de toneladas al año de residuos de los cuales solos se recicla el 17% [1]; mientras que en la capital del país se generan 195 825 toneladas/mes (ton/mes) y solo se aprovechan 14% [2], motivo que genera gran preocupación al gobierno debido a la escasa cantidad de material reciclado.

En Colombia, existen dos grandes empresas que se encargan de reciclar la resina PET de botellas, una de ellas es Enka la cual recicla 24 000 toneladas y Apropet que recicla 7 200 toneladas anuales, cantidades que siguen siendo bajas ya que la industria demanda 42 000 toneladas a nivel nacional [3]. Además, dichas empresas realizan su proceso de reciclaje de forma mecánica, lo cual genera una limitación a la hora de reciclar la mayor cantidad de plástico posible, debido a que en la actualidad hay una cantidad de PET posconsumo que es coloreado y multicapa, estos dos tipos de PET son imposibles de reciclar mecánicamente [4], razón por la cual, surge la idea de generar una propuesta donde sea posible reciclar este tipo de plástico, ya que al no ser posible su reciclaje de manera mecánica, es dispuesto en los rellenos sanitarios [4].

El reciclaje químico del PET coloreado y multicapa, surge como una solución de aprovechamiento de este residuo, con el objetivo de disminuir la generación de desechos sólidos y promover un cambio de una economía lineal a una economía circular, ya que estos procesos de aprovechamiento tienen la capacidad de reutilizar el plástico PET, generando diferentes productos con la capacidad de ser empleados como materias primas en la fabricación del mismo polímero

virgen, de igual manera, se pueden obtener compuestos intermediarios capaces de generar utilidad en otros sectores industriales, combustibles o derivados petroquímicos [5]; por lo cual, en este trabajo se diseñó una propuesta de reciclaje que permita gestionar el residuo plástico PET que mecánicamente no es posible tratar.

En esta propuesta, se realizaron acercamientos respecto a las alternativas de reciclaje para el PET posconsumo a nivel internacional, posterior a ello, se caracterizó cuantitativamente la cantidad y distribución de los desechos plásticos PET en la ciudad de Bogotá, seguido de la selección de un proceso acorde con los criterios establecidos, aplicando referentes bibliográficos así como con la utilización de programas de simulación de procesos, lo que permitió establecer las especificaciones técnicas de dicho proceso. Finalmente con esta última herramienta descrita, se efectuó un costeo preliminar de equipos y utilidades en el diseño propuesto, con el fin de ofrecer una alternativa diferente, que puede tener un potencial para su ampliación a nivel industrial para la ciudad de Bogotá, todo esto con el fin de aumentar el porcentaje de reciclaje y así lograr disminuir la problemática de residuos que actualmente se presenta en esta ciudad.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer una alternativa de reciclaje para los envases de bebidas de plástico PET posconsumo de la ciudad de Bogotá.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el plástico PET posconsumo que se usará en el proceso de reciclaje.
- Seleccionar un proceso de reciclaje para los envases de bebida del plástico PET posconsumo.
- Establecer las especificaciones técnicas del proceso seleccionado para el PET posconsumo.
- Realizar un costeo preliminar para la implementación de la tecnología seleccionada.

1. GENERALIDADES

1.1 Alternativas de reciclaje del PET

En la fabricación del PET ámbar y de color, se emplean aditivos con el objetivo de lograr la coloración de la botella, los cuales son en su mayoría colorantes y pigmentos orgánicos e inorgánicos [6]. Entre los principales colorantes y pigmentos utilizados, encontramos al dióxido de titanio (TiO_2), óxido de hierro (FeO), óxido de zinc (ZnO), quinacridona, perileno y antraquinona [7]. En el caso de las tintas, las cuales son solubles en el plástico, se mezclan muy fácilmente y se suelen emplear para colorear plásticos transparentes, normalmente poliésteres amorfos. Por otra parte, los pigmentos son parcialmente solubles (orgánicos) e insolubles (inorgánicos). Por lo anterior, es que dichos aditivos contaminan el proceso de reciclaje mecánico que involucra PET transparente, razón por la cual no se pueden mezclar estos dos tipos de desechos [8], ejemplo de ello, un empaque coloreado que contiene una tinta adherida a la molécula del PET, hace imposible volverla transparente de nuevo [8]. Por lo anterior, para reciclar el PET ámbar y transparente existen diferentes formas mecánicas a la convencional, alternativas que se expondrán a continuación.

Entre las aplicaciones a la hora de reciclar PET ámbar está la formación de geotextiles, lasos de amarre, estibas plásticas, juegos infantiles, pisos, entre otros [9]. Uno de los emprendimientos ganadores en el reto Bavaria 2014, fue la empresa colombiana Braxxon, la cual presentó una propuesta para la reutilización de los empaques de PET ámbar; este emprendimiento se dedica a la fabricación de estibas a partir del plástico obtenido por la reutilización de los envases. Es así que se espera que Braxxon empiece a producir estibas a partir de 1 500 toneladas de PET ámbar, no obstante, Bavaria produce cerca de 9 mil toneladas de PET ámbar al año, por lo que el reto de reutilizar este material se incrementa debido a su alta cantidad y la poca gestión en el manejo de estos residuos [10].

Actualmente, la compañía BAVARIA realizará la entrega de 30 000 máscaras de protección facial a instituciones de salud, las cuales fueron creadas con material PET reciclado de los envases de Pony Malta y Agua Zalva y elaborados por la empresa en alianza con APROPET, empresa recicladora en Colombia, información que fue anunciada a través de Gestión y Medios [11].

En cuanto a las alternativas para el uso de material posconsumo de botellas PET son amplias, entre ellas se encontraron: la producción de postes plásticos, material de punto de venta (mesas y sillas), material publicitario, escobas, fibras textiles, materiales de construcción (ladrillos), ganchos para ropa, árboles de navidad, desarrollos viales (bases, sub bases, asfalto, adoquines) y tanques de agua [12]. Como se puede observar, estas alternativas pretenden dar una segunda vida al plástico, sin embargo, son pocas las alternativas que pueden representar un volumen significativo para la recuperación del material, excepto en el caso de las fibras y los materiales para desarrollos viales podrían representar dicho volumen, lo que se presume puede deberse principalmente a que las alternativas propuestas no son artículos de consumo masivo; por lo cual estas soluciones resolverán ciertas cantidades de toneladas PET, pero no el total de éstas [12].

Asimismo, en la actualidad existen ciertas iniciativas y estudios con el PET ámbar, una de ellas pertenece a la empresa Ekored, considerada como la empresa más grande recicladora PET de Colombia. Ekored recicla cerca de 3 000 000 botellas de PET al día, siendo transformadas en hilos PET para la industria de textil y en pellets para la industria de las gaseosas [13]. Otra de las alternativas que llama la atención, es la obtención de placas decorativas a partir de PET reciclado, para el posible reemplazo de cerámicas de tipo decorativo, en éste caso se realizaron mezclas de PET ámbar con PET transparente y PET verde (PV) permitiendo mejorar las propiedades mecánicas y lograr diferentes tonalidades en la placa. Esta alternativa se probó experimentalmente obteniendo muy buenos resultados, se optimizaron variables como temperatura (320° C) y tiempo (40 minutos); empleando un enfriamiento en agua. Tales resultados muestran que este proceso puede considerarse como una buena opción para disminuir el impacto ambiental, ya que se necesita gran volumen de PET para la elaboración de cada placa. Basados en los resultados de los análisis térmicos de los diferentes tipos de PET, se encontró que al adicionar PT y PV se presenta disminución en la resistencia a la flexión debido a que la temperatura de degradación de los mismos está cercana a la temperatura de trabajo (320 °C) [14].

En el año 2009, se inauguró en México, PetStar, una planta de reciclado que produce, a partir de PET posconsumo (PCR), material grado alimenticio para la industria embotelladora de refrescos y aguas, como es el caso de Coca-Cola, Bonafont y Pepsi-Cola [15]. De igual manera, encontramos la empresa Enka de Colombia la cual está utilizando las botellas recicladas de gaseosas, aguas, aceites y otros empaques elaborados a partir de PET transparente para la elaboración de fibras

marca eko, de alto valor agregado, para la fabricación de hilos, no-tejidos y rellenos, destinados principalmente al mercado colombiano y de otros países de la región; posteriormente, estos productos son utilizados en la fabricación de jeans, pantalones, camisetas y ropa de hogar [15].

Entre las aplicaciones mencionadas, también se encontró una que consiste en producir materiales convencionales como la madera plástica, por medio de la combinación de celulosa y polietileno de tereftalato PET [14]. Ya en cuanto a las aplicaciones que se han hecho al PET desde el punto de la ingeniería civil, se tienen aquellas relacionadas con asfaltos, concreto y ladrillos, donde las mezclas asfálticas se pueden intervenir con diferentes porcentajes de PET, no obstante, es necesario conocer la dosificación exacta de aplicación de este material, debido a que la mezcla asfáltica puede verse afectada mecánicamente por la presencia de este material [16]. Es así que la incorporación de PET, puede mejorar significativamente algunas propiedades del concreto debido a que el plástico tiene alta dureza, buen comportamiento de abrasión, baja conductividad térmica así como alta capacidad calorífica.

Actualmente la compañía Miniwiz, compacta toneladas de plástico y otros materiales para construir escuelas, teatros, entre otras edificaciones, gracias a los ladrillos de plástico con adición de PET. Esta empresa ubicada en Londres (Inglaterra), Taipéi (Taiwán) y otras ciudades, ha construido edificios con esta tecnología, gracias a Miniwiz y sus máquinas, los cuales transforman el plástico y lo reciclan, asimismo, lo hacen con otros materiales poco reutilizados, evitando así que vayan a parar a los basureros [17].

Ya en el caso de los usos que se les da a los residuos de PET químicamente, se encuentran empresas de talla mundial, que realizan procesos químicos con cantidades considerables de residuos PET posconsumo, para la obtención de diferentes productos. “Agilyx” es una de ellas, empresa norteamericana de bioplásticos, la cual desde el año 2018 tiene en funcionamiento una planta piloto de pirólisis que trata un promedio de 10 toneladas/día (ton/día) de desechos Plásticos [18]. Por otra parte, la empresa suiza “Chiba Recycling Center” realiza un proceso de gasificación, en una planta ubicada en Japón, que gestiona alrededor de 150 ton/día de residuos municipales, logrando producir 50 ton/día de gas de síntesis [19]. Asimismo, Eastman, es una empresa estadounidense que procesa 100 000 toneladas métricas de PET, tiene un proceso actual de metanólisis donde a través de desechos plásticos PET, obtienen ácido tereftálico y etilenglicol, con

esto es posible obtener una resina PET virgen, comercializando el producto obtenido a industrias como Kodak [18].

Estos procesos químicos usados en la actualidad, generan dos diferentes tipos de productos, en primera instancia, en procesos como pirólisis y gasificación se logran generar gases de síntesis que son empleados para obtención de energía, ya en el caso de los procesos de despolimerización, como glicólisis e hidrólisis, se obtienen los monómeros iniciales (ácido tereftálico y etilenglicol) del PET.

Se puede concluir que la resina PET tiene amplias aplicaciones para ser reciclada los monómeros con los cuales se fabrica, el etilenglicol y el ácido tereftálico [20], se utilizan para diferentes aplicaciones industriales. Los usos principales para el etilenglicol, es que se emplea como anticongelante en sistemas de refrigeración y calefacción, como disolvente en la industria de pinturas y plásticos y como ingredientes de los líquidos descongelantes utilizados en las pistas de los aeropuertos, además se utiliza en líquidos hidráulicos para frenos, entre otros [21].

En el caso de los monómeros del PET, el ácido tereftálico, se ha planteado en el uso de productos médicos como el DACRÓN, un injerto protésico hecho de un material de poliéster artificial (sintético). Debido a su consistencia puede ser utilizado para reemplazar los tejidos naturales afectados como los vasos sanguíneos afectados [22]. Otra interesante aplicación son las películas de poliéster basadas en ácido tereftálico, estas son cubiertas por otros elementos como emulsiones químicas, para ser usadas en rayos X y microfilms, además al ser cubiertas por emulsión magnética se usan en cintas de audio y video; también se les llega a utilizar como intermediarios para adhesivos o recubrimientos [23].

1.2 Mercado del PET en Colombia y el mundo

En Colombia los índices de reciclaje de PET son bajos. Se estima, según Acoplásticos, que de los 12 millones de botellas que salen al mercado a diario, únicamente tres millones se reciclan [24] siendo una cifra aún muy baja, por lo que resulta importante incrementar el volumen de plástico dispuesto para el reciclaje. Ahora bien, empresas como Postobón y Coca-Cola envasan en PET reciclado, algunas de ellas buscando incrementar sus índices de PET reciclado, ejemplo de ello tenemos a Postobón que en la actualidad usa 46% de resina PET reciclada en sus envases, y tiene la meta de aumentar al 70% para el 2024 [24].

Para el año 2014, la demanda de envases PET globalmente ronda la cifra de 48 mil millones de dólares, con un consumo total de 16 millones de toneladas [25], de acuerdo con un estudio de mercado de Smithers Pira. Se proyecta que la demanda global crezca en 4,6% anual dentro de los próximos cinco años, para sumar así 19,9 millones de toneladas, en atención a que el uso de las botellas se ha incrementado, representando 80% del total de la demanda de PET [25].

En el año 2013, la mayor demanda de botellas de PET fue para los envases de agua, con un crecimiento de 7,3% (5,60 millones de toneladas). En comparación, la demanda de botellas de PET para bebidas carbonatadas, aumentó en 1,8% (5,17 millones de toneladas) [25]. Se cree que las botellas de agua mostrarán hasta 2020 el mayor crecimiento, del 6%, seguidas por los empaques farmacéuticos y las botellas de PET para otras bebidas, ambos creciendo a tasas de 5% [25].

Según un estudio de mercado, las tasas de reciclaje más altas se encuentran en Europa y Asia, con países que superan el 30%. América Latina, en cambio, tiene cifras muy bajas, para el caso específico de Colombia, se observa un 2% [26]. Mientras que a nivel mundial, se recicla el 41% del PET, del cual el 90% proviene de botellas; en Colombia apenas se está reciclando el 22%; ya en otros países como Argentina y Brasil, se están reciclando el 34% y 56% respectivamente [26]. Estos valores representarían una unidad de negocio para las empresas, puesto que el mercado se está iniciando su explotación.

Basados en estudios realizados en los últimos 10 años en Colombia, la industria de plástico creció en un 5% promedio anual [26]; en la que de las 312 empresas más destacadas del sector de plásticos en Colombia, 39 desarrollan procesos de recuperación, reciclaje y comercialización de resinas plásticas post industria y post consumo y representan una participación total en las ventas del sector de plásticos cercana al 6% [26]. De este porcentaje mencionado, Bogotá y Soacha, representan uno de los lugares de desarrollo más importantes del reciclaje y comercialización de resinas plásticas, con una participación en ventas del 86% [26].

Referente al uso del PET reciclado en la industrial, desde el 2002 el consumo de este material reporta un crecimiento anual del 8,1% a nivel mundial, por ejemplo en Colombia para el año 2011 se consumieron 95 000 toneladas [26]. En el país, existen dos grandes operadores de reciclaje PET, el grupo Enka que cuenta con una planta en Medellín y una sede en la ciudad de Bogotá y Aproplast con sede en Bogotá, quienes han liderado el sector reciclador de envases en Colombia [26].

En el país, la mayor parte de las resinas plásticas son importadas ya que no se producen, a diferencia del polipropileno el cual es elaborado por la fábrica filial de Ecopetrol, Propilco, la cual no solo abastece el mercado nacional, sino que una gran parte de su producción se destina para la exportación [27]. Entre los principales importadores de plásticos el año pasado, se encuentran Dow Química de Col S A (11,19%), Gaseosas Posada Tobon S. A. (2,27%), Smi Col S. A. S. (2,11%), entre otras empresas [28]. Las principales importaciones de materias primas de plástico que más adquiere Colombia, son el polietileno de densidad mayor a 0,96, seguido por polímeros tereftalato de etileno [27]. Entre los principales países de donde provienen las importaciones de plástico en Colombia se encuentran Estados Unidos, China, Brasil, México, Corea del Sur, Alemania y Perú [28]. Por último, los países donde más exporta Colombia plásticos, son Brasil, México y Estados Unidos [28] .

Finalmente es importante considerar el precio del residuo PET en Colombia, el cual está basado en la demanda, en los precios fijados por el sector de chatarrería y agremiación de recicladores, actualmente el precio de compra oscila entre \$ 500–\$ 600 pesos colombianos por kilogramo [26]. Por último, en cuanto los precios del PET, los precios hojuelas PET-RECICLADO en Colombia de PET lavado es de \$1 200 - \$1 600 pesos colombianos/kg y de PET lavado y secado es de \$2 000 pesos colombianos/kg [27]. Los precios del residuo PET en Colombia, se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1.

Precio del residuo PET en Colombia.

MATERIAL	PRECIO (pesos/kg)
PET verde	392
PET ámbar	300
PET natural	400
PET aceite	1000

Nota. Precios de los diferentes tipos de residuos de PET. Tomado de: C. Jiménez and J. Meneses, “Estudio de prefactibilidad para la creación de una empresa productora de resinas de plástico recuperado PET en la ciudad de Bogotá,” Universidad Distrital Francisco José De Caldas, 2016.

1.3 Marco conceptual

A continuación, se relacionan los conceptos relacionados al proceso.

DESPOLIMERIZACIÓN: La despolimerización es el proceso de descomposición de la cadena del polímero hasta sus monómeros u oligómeros; por lo general se logra con alta temperatura (térmica) o agentes hidrolíticos (química) [26].

RECICLAJE: Consiste en convertir residuos para obtener una nueva materia prima o producto, mediante un proceso fisicoquímico o mecánico, a partir de productos y materiales ya en desuso o utilizados. De esta forma, conseguimos alargar el ciclo de vida de un producto, ahorrando materia prima y beneficiando al medio ambiente [28].

TEREFTALATO DE POLIETILENO: Conocido como PET, es un polímero termoplástico muy utilizado en el sector de la alimentación [29]. Este plástico tiene alta cristalinidad y transparencia, aunque admite cargas de colorantes, de igual forma, tiene un buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes y alta resistencia al desgaste [29].

POLÍMEROS: Los polímeros son macromoléculas que se forman por la unión de un gran número de moléculas con un bajo peso molecular, las cuales se denominan monómeros, los

plásticos son un claro ejemplo de polímeros. Un polímero, por lo tanto, es un compuesto orgánico, que puede ser de origen natural o sintético, con alto peso molecular [26].

POSCONSUMO: El posconsumo es una estrategia ambiental de largo plazo, orientada a que algunos residuos de consumo masivo generados en nuestros hogares, las instituciones, el comercio, entre otros, sean separados desde la fuente de los demás residuos y sean manejados de forma adecuada, promoviendo su recuperación o reciclaje [30].

ÁMBAR: Pigmento aplicado a diferentes envases PET con el fin de filtrar la luz ultravioleta, esto limita la inclusión en una cadena de reciclaje de PET transparente [9].

GAS DE SÍNTESIS: Es un gas producido a partir de materiales ricos en carbono, como el carbón, la hulla, el coque, la nafta o la biomasa. se usa como base en la producción de amoníaco, metanol o incluso en la transformación del metanol en gasolina. Asimismo, es la base en la producción del Gas Natural Sintético [31].

1.4 Marco legal

La gestión de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Bogotá se encuentra reglamentada por diferentes entidades gubernamentales, encargadas de supervisar las actividades de almacenamiento, recolección, transporte y tratamiento de este tipo de residuos. En la tabla 2, se presenta una recopilación de las normas y reglamentaciones para este tipo de actividades.

Tabla 2.*Marco Legal*

Artículo 34, Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974	Para el manejo de residuos, basuras, desechos y desperdicios, se utilizarán los mejores métodos, de acuerdo con los avances de la ciencia y la tecnología.
Ley 09 de 1979 Art. 25,27 y 37	Las empresas de aseo deberán ejecutar la recolección de las basuras con una frecuencia que impida la acumulación en el lugar.
Ley 09 de 1979	Da entrada a las medidas sanitarias sobre manejo de los residuos sólidos.
Declaración de Río 1992	Establece una alianza mundial en la cual se acuerda respetar los intereses de todos y de proteger la integridad del sistema ambiental
Documento CONPES 2750 de 1994	Inserta las políticas sobre manejo de residuos sólidos.
Guía Técnica GTC 35 de 1997	Fija la guía para la recolección selectiva de residuos sólidos.
Política para la Gestión integral de Residuos 1998	Es obligación del Estado orientar y establecer un marco de acción para las entidades públicas con responsabilidades de la gestión de residuos sólidos.
Resolución 1096 de 2000	Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico.
Resolución 260 DE 2011	Fijar las tarifas para el cobro de los servicios de evaluación y seguimiento de licencias, autorizaciones y demás instrumentos de control y manejo ambiental.
Ley 1450 de 2011; artículos 223 al 226	Estudio de Impacto Ambiental contendrá información sobre la localización del proyecto, y los elementos del medio que puedan sufrir deterioro por la actividad.
Decreto 2981 de 2013	Establece el régimen general de los servicios públicos domiciliarios, incluido el servicio público de aseo. El servicio de recolección municipal de residuos principalmente sólidos.
Documento CONPES 3874 de 2016	Desarrolla la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario.
LEY 1259 DEL 2018	Implementar el Comparendo Ambiental, a todas aquellas personas naturales o jurídicas que infrinjan la normatividad existente en el manejo de residuos sólidos.
Resolución 1447 2018	Se aplica a toda persona natural o jurídica que realiza su iniciativa de mitigación de gases de efecto invernadero para optar por pagos o compensaciones.
Resolución 1407 2018	En esta resolución se determinan las obligaciones del productor, de las empresas que utilizan los envases y empaques y de las empresas transformadoras.
Documento CONPES 3918 de 2018	Establece las metas y las estrategias para el cumplimiento de la Agenda 2030 y sus ODS en Colombia
Agenda 21 (capítulo 21)	Incorpora las bases para un manejo integral de los residuos sólidos municipales como parte del desarrollo sostenible.
Norma técnica colombiana GTC 24 residuos solidos	Da entrada a los lineamientos sobre la separación en la fuente y el Código de Colores para residuos reciclables y no reciclables.

Nota. La tabla recopila las principales normas y reglamentaciones de la gestión de residuos sólidos. Tomado de: Roncancio Kelly (2018) *Análisis del reciclaje químico como alternativa tecnológica para la valorización y disposición final de residuos plásticos post-consumo,* Univ. Mil. nueva Granada, pp. 13–14, 2017.

Las reglamentaciones respecto a la gestión de residuos sólidos urbanos, presentan normas y resoluciones en las actividades de transporte, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de residuos sólidos, es así que sobresalen leyes ambientales aplicadas a industrias que incentivan la actividad de reciclaje y manejo de desechos sólidos; leyes sociales y políticas enfocadas en la economía circular, para la protección de entornos públicos a partir de recolección de basuras, fomentando el trabajo digno de recicladores y aumentando las ofertas de estos. Dichas reglamentaciones promueven activamente la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible ODS, específicamente los siguientes: ODS 8. (Trabajo decente y crecimiento económico); ODS 9. (Industria, innovación e infraestructura); ODS 11. (Ciudades y comunidades sostenibles); ODS 12. (Producción y consumos responsables) y ODS 15. (Vida de ecosistemas terrestres).

2. CARACTERIZACIÓN PLÁSTICO PET POSCONSUMO

El desarrollo del segundo capítulo fue realizado con base en la metodología descrita a continuación:

En primer lugar, se realizó una búsqueda referente a los desechos sólidos generados en la ciudad de Bogotá, en donde se recopiló información de acuerdo con el tipo de material presente, para esto; se recuperó información de la Unidad Especial de Servicios Públicos de Bogotá (UAESP). A continuación, se investigó la cantidad de estos materiales que tienen algún tipo de aprovechamiento, estos datos fueron obtenidos de igual manera de la UAESP, para una mejor visualización, los datos se representaron en gráficos tipo torta. Para el objetivo relacionado con una caracterización cuya dirección va de conceptos generales a específicos, se obtuvo información relacionada con la recuperación y aprovechamiento de los plásticos en Bogotá, datos que de igual manera fueron representados gráficamente.

Posterior a ello, se describió la actividad actual de reciclaje en Bogotá, específicamente para resinas plásticas PET, ejecutando una búsqueda referente a los residuos actuales de PET y demás resinas presentes, para determinar así la cantidad de PET a tratar, para ello se tomaron dos años de referencia (2013 y 2018), de la misma fuente de información (UAESP) obteniendo una caracterización más certera respecto al PET a estudiar.

A continuación, se recopiló una proyección respecto a la oferta y demanda del PET de los próximos años, obtenida de S. Acevedo [33]. Se presentó una metodología básica para el acondicionamiento de un plástico PET posconsumo para cualquier proceso de aprovechamiento, información recuperada de diversas fuentes bibliográficas (ScienceDirect y Google Scholar). Finalmente se presenta una composición del PET, información recuperada de diferentes fuentes bibliográficas. Como herramientas de información, se emplearon búsquedas en las principales entidades públicas gubernamentales como: DANE, UAESP, MADS, asimismo, se utilizaron operadores booleanos en el buscador de internet, para los documentos de estudios recuperado de otras universidades, en este caso se aplicó la ecuación de búsqueda *Residuos + PET* “AND” *Bogotá*.

2.1 Generalidades Residuos Sólidos de Bogotá

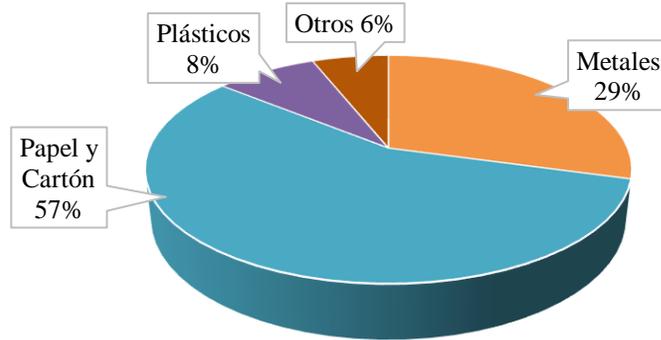
Para abordar el tema de residuos PET es necesario conocer ciertas generalidades importantes de los residuos generados en la ciudad, ya que esto permite tener un mejor panorama de varios aspectos importantes como son: la distribución de los diferentes materiales que generan residuos, los materiales más aprovechables y observar en qué situación se encuentra el plástico, enfoque principal de este documento.

En la ciudad de Bogotá, actualmente se generan un promedio de 195 825 ton/mes de desechos sólidos, lo que equivale a 6 527 ton/día, de las cuales la unidad administrativa especial de servicios públicos (UAESP) realizó una estimación de la distribución de los diferentes residuos en porcentajes, donde se obtuvo que del tipo orgánico corresponde a un 65,48 %, plástico 16,88 %, papel 5,19 %, cartón 2,92 %, vidrio 3,67 % y metales 0,68 % [34]-[29]-[35]. De esta cantidad de residuos generados en Bogotá, solo se recicla alrededor del 14 % [36], por lo cual es necesario aumentar la cantidad de residuos reciclados, para disminuir de alguna forma el problema ambiental generado por desechos sólidos.

En cuanto al aprovechamiento de residuos en el 2018, se reportaron 781 776 toneladas aprovechadas en la ciudad de Bogotá [35]; este reporte incluyó 28 tipos de material agrupados en 6 familias: metales, papel y cartón, plásticos, vidrios, textiles y maderas. Durante este año, 113 prestadores de la actividad de aprovechamiento reportaron las toneladas aprovechadas a el Sistema Único de Información de Bogotá (SUI), datos con los cuales se calcularon los porcentajes de los materiales aprovechables [37]. La distribución de estos materiales se observa en la figura (1).

Figura 1.

Distribución de los residuos aprovechados en Bogotá 2017

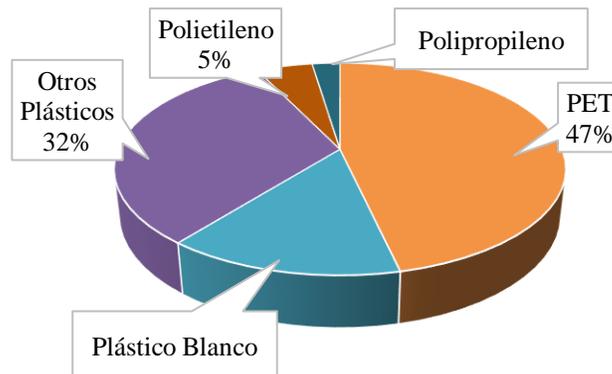


Nota. La gráfica describe la distribución de los residuos aprovechados en Bogotá en 2017. Tomado de: C. UAESP, “*Estudio técnico de la caracterización en la fuente de residuos sólidos generados en la Ciudad de Bogotá Distrito Capital,*” *Unidad Adm. Espec. Serv. Públicos*, vol. 1, p. 13, 2017. [Online] Disponible: <https://www.uaesp.gov.co>.

Como se puede observar en la figura (1), el plástico se aprovecha en un 8 %, de dicho porcentaje, se evidencia las cantidades por tipo de plástico especificado que son aprovechados en Bogotá (figura 2), esta caracterización del Sistema Único de Información de servicios públicos domiciliarios (SUI) lo obtuvo del reporte realizado por los 113 prestadores de aprovechamiento de residuos.

Figura 2.

Reporte tipos de residuos aprovechados en Bogotá 2017



Nota. La grafica describe la distribución de los residuos aprovechados de diferentes tipos de plástico, tomado de: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “*Informe Sectorial de la Actividad de Aprovechamiento 2018,*”. [Online] Disponible: <https://www.superservicios.gov.co>.

En cuanto a la figura 2, se puede observar que una de las resinas más aprovechadas por las empresas recicladoras en Bogotá es el PET, con una cantidad de 24 391 toneladas/año (ton/año); demostrando que es necesario un aumento del aprovechamiento de esta resina, la cual presenta una gran demanda.

Finalizando con las generalidades de residuos sólidos, es importante tener en cuenta que los materiales con mejor remuneración en procesos de reciclaje, se encuentran en primer lugar los residuos metálicos con un 49,75 %, le sigue el papel y el cartón con un 35,01 %, el tercer lugar, lo ocupa el plástico con un 11,15 % y por último se encuentra el vidrio con un 4,09 % [39]. Estos materiales son recolectados principalmente por los recicladores informales, los cuales aportan el 52,5 % de los productos reciclados y las empresas privadas que aportan el 47,5 % restante [40].

En este apartado se logra observar los porcentajes de los residuos plásticos y otros materiales que se encuentran en la ciudad de Bogotá, incluso se determinó el porcentaje de aprovechamiento de estos materiales, donde posteriormente se observa el porcentaje caracterizado del plástico que es aprovechado en Bogotá. Por último, se expuso el material que es mejor remunerado para reciclar, donde se determinó que el plástico está en el último lugar, por lo que se presenta poco porcentaje de plástico aprovechado.

2.1.1 Actualidad reciclaje de plástico PET en Bogotá

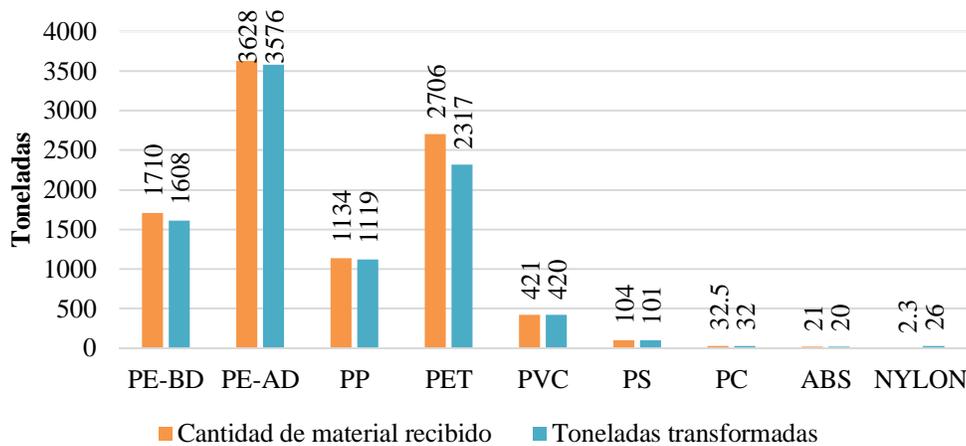
Anteriormente se discutió sobre las generalidades de los residuos en Bogotá con el fin de dar un panorama claro de la situación de residuos en la ciudad, en este apartado se expondrá de manera breve la situación actual de la resina de importancia para este estudio, la cual es el tereftalato de polietileno (PET), con el fin de tener mayor claridad como se encuentra dicha resina en Bogotá.

Un estudio realizado en el 2019 por Acoplásticos y la Universidad Piloto de Colombia, reveló que 200 empresas recicladoras de plástico posconsumo de Bogotá transforman en promedio, 9 000 ton/mes, lo que significa que, al año, estas empresas reciclan cerca de 110 mil toneladas de desechos plásticos; según el estudio realizado, identificaron que de las 200 empresas, 104 compran el plástico posconsumo a sectores como cadenas de restaurantes, clínicas, comercializadoras, plazas de mercado y laboratorios; 90 empresas compran el material a recicladores de oficio y ocho empresas hacen recolección directa de los desechos plásticos; ninguna empresa, realiza

importación de material reciclado para sus procesos de transformación [41]. Vale la pena aclarar que el estudio se realizó para todas las resinas plásticas y no solo para el PET, donde los datos se pueden observar en la figura (3).

Figura 3.

Material plástico posconsumo transformado por empresas de Bogotá. 2019



Nota. la figura muestra el plástico recibido y transformado por 113 empresas de reciclaje. Tomado de Acoplásticos, “200 empresas de Bogotá reciclan y transforman cerca de 110 mil toneladas de plástico posconsumo al año,” *ColombiaPlast*, 2019 [Online] Disponible: <https://www.acoplásticos.org/index.php>

Como se puede observar en la figura (3), la cantidad de PET posconsumo que reciben las empresas en Bogotá es de 2 706 ton/mes; por lo cual, es necesario generar una mejor gestión que permita obtener mayor cantidad de esta resina reciclada.

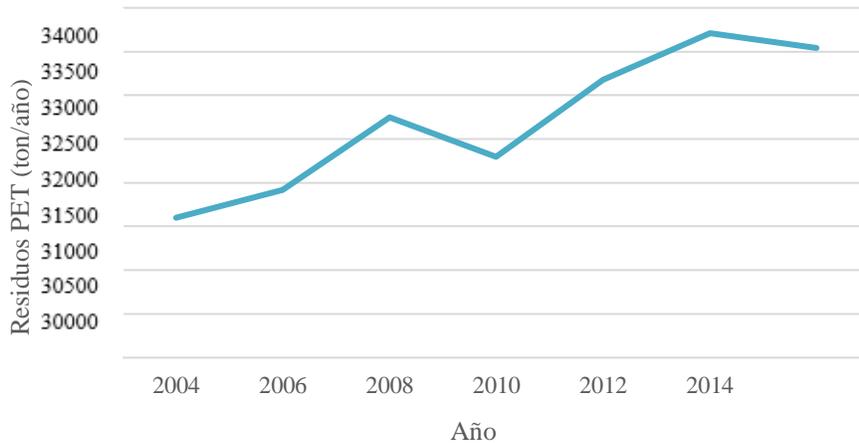
En Bogotá existen actualmente dos grandes empresas de tratamiento de plástico nivel industrial: Apropet y el centro de reciclaje “*La alquería*”, la primera cuenta con dos líneas de reciclaje, una de 200 ton/mes y otra de 600 ton/mes [33]; y la segunda se diseñó para una capacidad de procesamiento de 300 ton/día, cabe aclarar que esta última cuenta con el tratamiento de varios residuos sólidos como vidrio, papel, cartón, plástico, etc. Los plásticos tratados en esta planta no emplean mecanismos de adecuación, por lo tanto, no hay una clara distinción del tipo de plástico ingresado al proceso [42].

A continuación, se presenta en la figura (4), el comportamiento de la cantidad de residuos PET generados en los últimos años donde se puede ver un aumento de estos en 1 000 ton/año, sin

embargo, también se observa que a partir de 2014 se generó un decrecimiento leve del residuo, lo que permite concluir que el residuo PET de diferentes tipos, varía en el transcurso de los años en la ciudad de Bogotá.

Figura 4.

Generación de residuos PET en Bogotá, hasta el 2014

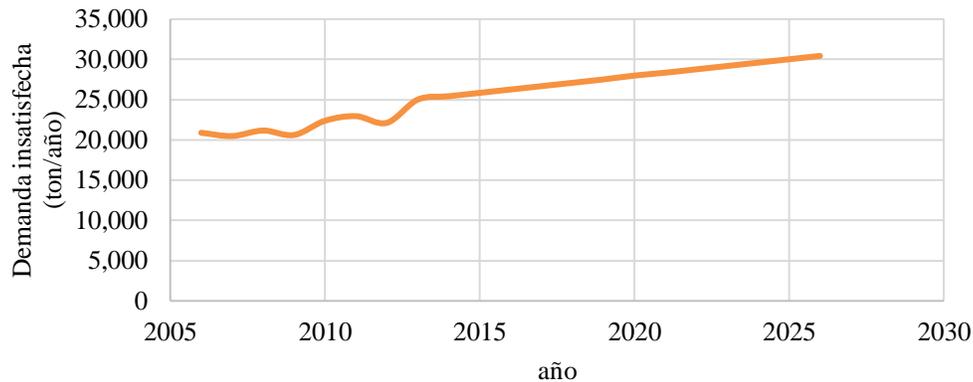


Nota. la figura muestra el aumento de residuos PET hasta el año 2014. Tomado de: Equipo técnico de la UAESP y PGIRS, “*Plan de gestión integral de residuos sólidos 2016-2027,*” UAESP, p. 1228, 2016. [Online] Disponible: <http://www.uaesp.gov.co/>

Finalmente, con respecto a la proyección del crecimiento del mercado PET actualmente en Bogotá, se puede observar en la figura (5), una proyección de demanda insatisfecha en los últimos años, así como los años posteriores a la hora de reciclar la resina plástica PET, teniendo en cuenta las dificultades en la recolección de los envases PET y que bajo nuevos métodos de recolección, puede ser impulsado el aumento de envases para transformación.

Figura 5.

Proyección demanda insatisfecha de resina PET en Bogotá



Nota. la figura muestra el crecimiento de la demanda del residuo PET. Tomado de: J. A. Vela Celis, R. J. S. Humberto, and J. A. Urrego Roldan, “*Diseño de maquina multifuncional de reciclaje de botellas PET, para el aprovechamiento de material solido con potencial a ser reciclado en una Gestión integral de residuos sólidos.*,” Univ. Dist. “Francisco José Caldas, no. June, p. 61, 2016. [Online] Disponible: <http://hdl.handle.net/11349/4737>

2.2 Caracterización de envase PET posconsumo

Después de conocer la situación de los residuos en Bogotá y de cuál es el papel que tiene el PET en esta ciudad, es necesario realizar una caracterización del PET más conveniente a utilizar en el proceso de selección posterior, dando una estimación aproximada de la cantidad que se podría obtener del PET elegido.

Actualmente en Bogotá, se consumen cerca de 2 387 758 botellas PET al día y son recicladas aproximadamente el 27 % de ellas, la ciudad presenta problemas con su relleno sanitario debido a la alta cantidad de desechos que son recibidos diariamente, motivos por los cuales es necesario iniciativas que contribuyan al aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos [43].

El material PET posconsumo se puede clasificar de acuerdo con si son multicapa, si son envases de color o si son transparentes, siendo el PET transparente el más apetecido y mejor pago, de igual forma se encuentran los de color verde, los de color café o también llamado ámbar, como los de los envases de la bebida Pony Malta, que se pagan a un precio inferior a los otros envases [40]. Estos últimos envases no se reciclan mecánicamente debido a que puede generar contaminación en

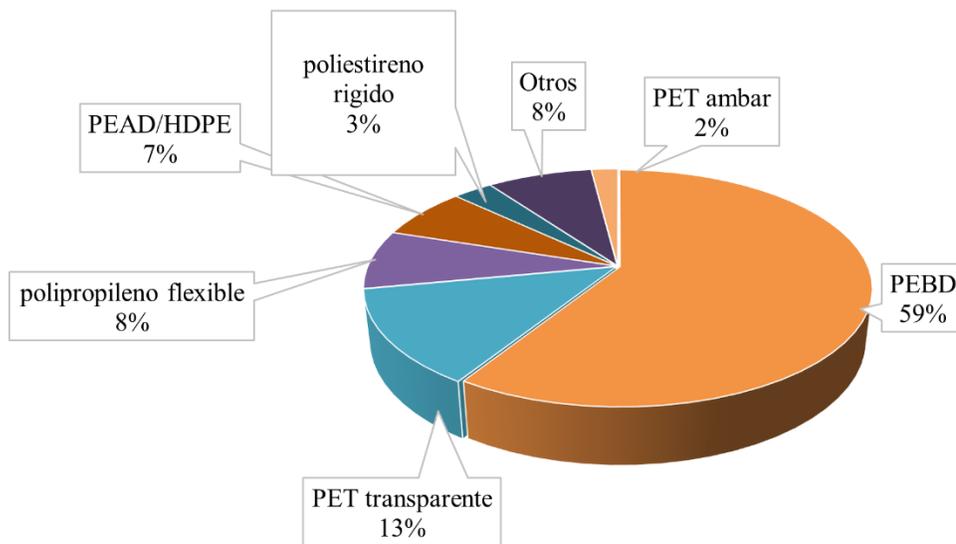
el proceso con el resto de PET transparente [44], por tal motivo el material que se usará en este proceso comprende PET tipo ámbar y coloreado.

En Colombia, el sector plástico genera 1,2 millones de toneladas por año, de los cuales, los envases y empaques equivalen al 56 % de tal cantidad [45]. El PET se usa en botellas de agua y aceites, envases de la farmacia, envases de jabones, empaques de alimentos, cintas de grabación y alfombras [21]. En cuanto la proporción y cantidad total de desperdicios de plástico que se generan en el relleno sanitario Doña Juana de la ciudad de Bogotá, estos están distribuidos, según su tipo, donde se puede determinar que el tipo de plástico más usado y, por ende, más desechado en los residuos sólidos urbanos, es el polietileno de baja densidad, con 59 % del total, usado en empaques y envases, electrotecnia, construcción, medicina y otras industrias.

El segundo tipo de plástico más desechado es el PET transparente, con un 13 %, el cual es usado en la industria de alimentos y bebidas para empaques y envases [46], estos porcentajes se pueden ver con mayor claridad en la figura (6).

Figura 6.

Distribución de desechos plásticos en Bogotá, 2013



Nota. la figura muestra la distribución de los residuos plásticos. Tomado de: J. P. Herrera Ramirez, “Reciclaje de pet post consumo usando máquinas reverse vending para el acopio del material para el acopio del material,” *Univ. Pilot. Colomb.*, pp. 1–109, 2015. [Online] Disponible: <http://polux.unipiloto.edu.co>: [46]

En cuanto a la cantidad de residuos plásticos generados, se estimó un aumento en el desecho de plástico PET coloreado y ámbar, para esta estimación se analizaron dos años 2013 y 2017, donde es posible evidenciar una ligera disminución de PET coloreado.

Tabla 3.

Volumen (ton/día) desechos plásticos en rellenos sanitarios, Bogotá 2013

Tipo de Plástico	Ton/día
Polietileno de baja densidad	337,34
PET transparente	72,24
Polipropileno flexible	45,47
Polietileno de alta densidad	39,79
Polipropileno rígido	17,05
Icopor	17,05
Otros	11,37
PET verde	5,68
PET ámbar	5,68
Total	568,4

Nota. La tabla muestra el volumen de desechos plásticos en Bogotá. Tomado de: C. UAESP, “*Estudio técnico de la caracterización en la fuente de residuos sólidos generados en la Ciudad de Bogotá Distrito Capital,*” Unidad Adm. Espec. Serv. Públicos, vol. 1, p. 13, 2017. [Online] Disponible: <https://www.uaesp.gov.co>

Tabla 4.

Caracterización de los residuos plásticos en Bogotá, 2018

Material	Resina	Porcentaje %	Ton/día
Flexibles	Polietileno (PE)	4,10 %	985,67
	Snacks	0,60 %	
	PVC Flexible	0,19 %	
Plástico	Polipropileno (PP)	0,26 %	
	Otros	3,43 %	
	PET aceite	0,15 % (1,47 ton/día)	
	PET ámbar y de color	0,16 % (1,57 ton/día)	
Rígidos	PET verde	0,24 % (2,36 ton/día)	
	Botellas PET ámbar	0,53 % (5,22 ton/día)	
	Botellas PET Verde	0,35 % (3,44 ton/día)	
	PET común	2,01 %	
Total, PET Coloreado		14,06 ton/día	

Nota. la tabla muestra la caracterización de residuos plásticos en Bogotá. Tomado de: C. UAESP, “*Estudio técnico de la caracterización en la fuente de residuos sólidos generados en la Ciudad de Bogotá Distrito Capital,*” Unidad Adm. Espec. Serv. Públicos, vol. 1, p. 13, 2017. [Online] Disponible: <https://www.uaesp.gov.co>

Según los datos recopilados, los desechos totales de PET han ido en incremento en la ciudad, sin embargo, los desechos de tipo PET coloreado han presentado una ligera disminución en el porcentaje dentro de la caracterización, no obstante, su cantidad sigue siendo alta en comparación al año 2013, debido a un aumento en los residuos plásticos. Esta disminución de porcentaje es resultado de que a través de los años, las regulaciones respecto al manejo de residuos sólidos de las empresas han sido más estrictas como lo muestra la *tabla (2). Marco legal*. Empresas como Bavaria [11] han puesto en marcha procesos de tratamiento para mitigar estos desechos. Otra razón existente, es la innovación en etiquetas termo encogibles como reemplazo a las botellas coloreadas, las cuales son una alternativa diferente y novedosa y pueden ser impresas hasta en siete colores; [47] estas tecnologías generan una disminución en la producción de botellas PET coloreadas por lo cual estas causas presentan la ligera diferencia entre los años recopilados.

Esta cantidad de residuos plásticos PET anteriormente expuestos en las tablas (3) y (4), pueden considerarse como una opción de aprovechamiento existente y generadora de valor para los residuos de esta índole, este potencial de reciclaje puede definirse como la base de cálculo para proyectar en el proceso alternativo de reciclaje que se expondrá posteriormente. Como se mencionó anteriormente, el PET principalmente es aquel material que el reciclaje mecánico no puede realizar, entre dichos materiales se encuentran: aquellos que poseen elevada contaminación orgánica, materiales monocapa, materiales coloreados, materiales multicapa, plásticos que han estado en el mar y han sufrido una severa degradación ambiental y por radiación UV y plásticos con aditivos que pueden estropear el proceso mecánico [4].

Vale la pena recordar, que el proceso de reciclaje mecánico es muy eficaz en el caso de objetos hechos con un único polímero u objetos cuyos múltiples componentes pueden separarse adecuadamente. Sin embargo, el proceso es complicado cuando se trata de objetos hechos con varios polímeros (por ejemplo, algunos envases alimentarios multicapa) o de residuos que están contaminados o que contienen sustancias no deseadas como aditivos, para estos casos resulta más conveniente un proceso químico [48].

En conclusión, el aumento en la demanda y oferta del plástico PET en Bogotá, ha generado un incremento en los desechos pos consumo de estos, sin embargo, para el caso del PET ámbar el porcentaje de caracterización de estos, ha disminuido ligeramente debido a causas expuestas

anteriormente. La cantidad aproximada de plásticos con características que dificultan su reciclaje mecánico, se encuentran en la tabla (3) y tabla (4), las cuales, permite obtener la cantidad de residuos de botellas PET verde y botellas PET ámbar, como fuentes de aprovechamiento de residuos, los cuales seran utilizados para la alternativa del proyecto.

2.2.1 Acondicionamiento del envase

Según la caracterización de residuos sólidos expuestas anteriormente, los residuos plásticos generalmente se presentan en los rellenos junto con otros residuos de nula importancia, por tal razón, es indispensable que antes de realizar un proceso de reciclaje, se debe acondicionar el plástico con el fin obtener mejores productos; las etapas de acondicionamiento son las siguientes:

- Selección del material: por medio de un proceso manual se elegirá el material que se desea reciclar en este caso el PET y se separa de aquel que no es deseado en este proceso, se separa las resinas diferentes al PET por medio del código RIC y si dicho material no cuenta con este código se realizará un método de identificación con infrarrojo [49]. En la actualidad se están utilizando diferentes técnicas para la clasificación del plástico entre las cuales están:

- a) Recolección manual: por lo general este proceso es una preclasificación ya que no es del todo confiable.
- b) Separación por densidad líquida: se conoce con el nombre de hundimiento/flotación, el cual es un sistema que consigue separar una mezcla de polímeros como HDPE, LDPE, PP, PS Y PVC. El procedimiento consiste en introducir la mezcla de plásticos trituradas en agua, la cual tiene una pequeña cantidad de surfactante, con el objeto de que el agua moje al plástico. Las poliolefinas quedan flotando en la superficie mientras que el PS y PVC se hunden en el fondo [50]-[51].
- c) Separación magnética: este equipo es muy utilizado en la industria recicladora y su función es separar metales magnéticos de corrientes de materiales que se transportan sobre bandas [52].
- d) Clasificación espectrofotométrica como UV/VIS, NIR, laser: permite identificar los diferentes plásticos analizando la luz reflejada por la superficie del material cuando es sometido a la radiación [52].

- Separación de diferentes materiales: una vez seleccionada y separada la resina de interés se procede a eliminar las etiquetas y desperdicios que contenga el material, generalmente elementos como tapas, etiquetas y añadidos no están elaborados de la misma resina PET, por lo cual afectan el rendimiento del proceso, si bien algunos procesos permiten el tratamiento de varias resinas, este proyecto no contempla el tratamiento de otro tipo de poliésteres [52].
- Lavado y secado: en esta etapa se realiza la separación de los agentes contaminantes por medio de lavaderos industriales, donde se limpia el material con agua, Tras la limpieza este material será introducidos en una centrifuga y secadora para ser secado y poder eliminar cualquier impureza que no se haya eliminado en el proceso de lavado. [52]
- Molienda: se realiza con la función de reducir el tamaño de los residuos, para facilitar su manejo. Este proceso se realizará en un molino de martillo [53]. Los procesos convencionales realizan una molienda en forma de trozo cuadrado de dimensiones de 4,8 X 3,7 cm, otros tratamientos requieren un tamaño de partícula menor, en estos casos se realiza una molienda más estricta en forma de escama o “Flake” con rangos de tamaño de 0,20-0,36 cm [54]. Las siguientes imágenes ilustran una botella PET después de su proceso de acondicionamiento para cualquier proceso de reciclaje

Figura 7.

Acondicionamiento botella plástica PET posconsumo



Nota. Esta imagen muestra como el plástico llega a la planta y como se convierte después de realizar el acondicionamiento. Tomado de M: “Moroni and A. Mei, “Characterization and separation of traditional and bio-plastics by hyperspectral devices,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8, 2020, doi: 10.3390/APP10082800.

2.3 Composición química envases PET

La composición de los envases con los que se va a realizar el proceso es de PET (Polietileno Tereftalato). El PET está compuesto de petróleo crudo, gas y aire; un kilo de PET está compuesto por 64 % de petróleo, 23 % de derivados líquidos del gas natural y 13 % de aire [55], en cuanto a los compuestos del petróleo que contiene dicha resina está el paraxileno y el etileno [56].

Como se observa en el gráfico (8), los envases del PET son fabricados a partir de las dos materias primas derivadas del petróleo etileno y paraxileno, los derivados de estos dos compuestos (etilenglicol y ácido tereftálico) son dispuestos a reaccionar a temperaturas y presiones altas para obtener la resina PET (proceso denominado policondensación) [57]. En la condensación del PET no se hace necesario la adición de plastificantes y antioxidantes y los colorantes y pigmentos son aplicados en ciertas ocasiones y en pequeñas cantidades, que varían desde un 0,1 % - 2 % [58].

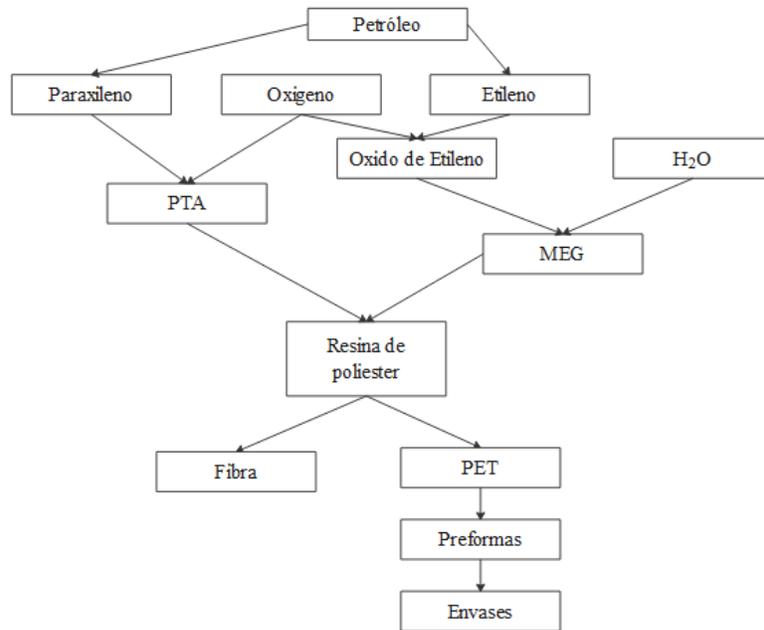
Dentro de las sustancias que dan color al PET se encuentran los pigmentos y colorantes, es común no diferenciarlos y así nombrarlos en conjunto; la diferencia fundamental es la solubilidad. Los pigmentos pueden ser insolubles y los colorantes se solubilizan en el PET [59]. Dado que una de las características importantes del PET es su translucidez, es más común el uso de colorantes cuando se quiere conservar esta característica. Aun así, hay muchos pigmentos, sobre todo inorgánicos, que son usados en el PET. La exigencia de resistencias térmicas altas hace que se usen más los pigmentos inorgánicos que los orgánicos, sin embargo, cada vez más, la fabricación de pigmentos orgánicos mejora acorde a las exigencias de resistencia térmica [59].

Por otro lado, entre los colorantes más comunes se encuentran las antraquinonas y los colorantes Monoazo [59], las antraquinonas son apreciadas por sus colores brillantes y su solidez a la luz y al lavado estos son insolubles en agua [60]-[61], y los colorantes Monoazo la mayoría son solubles en agua ya que tienen un grupo sulfonato que los hace solubles en el agua [62], por otra parte, se encuentran los pigmentos orgánicos entre los que se encuentran las ftalocianinas, quinacridona [59], dichos pigmentos son insolubles en agua y solventes orgánicos [63], en cuanto a los inorgánicos, se encuentran el dióxido de titanio, Azul Ultramar, óxido de hierro y óxido de cromo [59], dichos pigmentos también son insolubles en agua. Como se había mencionado, los colorantes Monoazo poseen una alta solubilidad en agua, estos se pueden remover por medio de carbón activado (adsorbente) el cual es un proceso de adsorción [64], los colorantes que son solubles en agua y no

son removidos totalmente por el carbón activado del filtrador, pueden ser extraídos del monómero glicolizado por medio del disolvente agua ya que se solubilizan en este y el monómero es separado del disolvente coloreado [65].

Figura 8.

Diagrama de producción de la resina PET



Nota. Esta imagen realiza una explicación breve de cómo se obtiene el PET. Tomada de: E. Riera and M. Castillo, “Química del PET,” *Centro de Investigación en Seguridad y Control Alimentario. Universidad Politècnica de Cataluña*, 2015

Para este segundo capítulo, se expusieron ciertas generalidades importantes para caracterizar el PET de Bogotá que se usó en el proceso, donde se expuso una breve explicación de la cantidad de residuos generados en Bogotá con los respectivos porcentajes de los materiales desechados y reciclados, en dicha caracterización se encontró el porcentaje de la resina de interés la cual es PET; del cual se determinó el residuo y el tipo de PET que se usará en el proceso, dando como resultado el PET coloreado y ámbar. No se tomó en cuenta el PET multicapa debido a la falta de información de este residuo en Bogotá, sin embargo, si este tipo de residuo llegara al proceso no se desecharía, sino que se buscaría la posibilidad de ingresarlo de igual forma en un estudio más profundo y certero. Posteriormente se detalló el acondicionamiento del envase previo al proceso de reciclaje y por último se expuso la composición general del PET.

3. SELECCIÓN DEL PROCESO DE RECICLAJE

En este capítulo se abordará las diferentes alternativas que existen para reciclar el PET, se determinaran ciertos criterios que para el investigador son de vital importancia para la selección del proceso, la selección de la alternativa, asimismo se realizará una matriz para determinar cuál es la mejor según los criterios establecidos, por último, se determinara que materiales se necesita para el proceso elegido y cuáles son sus condiciones de operación.

Metodología

Para la búsqueda de las alternativas se realizó varias bibliometrías por medio del programa Bibliometrix, dicho programa permitió obtener palabras claves sobre el tema de reciclaje en plásticos PET, arrojando las palabras más importantes de la bibliometría como lo era reciclaje químico, botellas plásticas, productos del plástico, pirólisis, gasificación, glicólisis, catálisis, degradación, etc. Las bibliometrías arrojaron las palabras que se repetían más en cada año, observando que la palabra reciclaje químico es una de las palabras que se repiten en gran proporción en los últimos años, por tanto, hay mayor investigación sobre el tema de interés en la actualidad. De igual manera, un gran aporte de las bibliometrías son la cantidad de artículos, libros y documentos que se encontraban en la base de datos Scopus, sobre el tema de reciclaje del PET, permitiendo así encontrar la cantidad de información que se requería sobre el tema de interés.

Estas bibliometrías revelaron una estructura conceptual que arrojaba un dendograma, el cual permitió ver los términos que tenían relación para así hacer una búsqueda más profunda con los operadores boléanos y la relación de estos términos, donde en el momento de realizar la búsqueda en las diferentes bases de datos como ScienceDirect, Scopus, Virtual pro, Knovel, Google Academic y Springer link, se aplicó la ecuación de búsqueda con operadores boléanos PET + RECYCLING AND ‘‘CHEMICAL PROCESS’’, esta búsqueda arrojaba diferentes documentos que mostraban las diferentes alternativas utilizadas para reciclar el PET y que fueron tomadas en este segundo objetivo para realizar una selección de una de estas alternativas encontradas en la literatura, las bibliometrías se pueden observar en el **Anexo 17**.

3.1 Criterios de selección para el proceso de reciclaje

Para seleccionar el proceso de reciclaje, fue necesario tener en cuenta ciertos aspectos importantes, tales como aspectos de tipo técnicos, económicos, sociales, así como la viabilidad ambiental de las alternativas expuestas [66], considerando el reciclaje como un medio eficaz para solucionar la problemática de los plásticos usados, adicionando un procesamiento químico o mecánico. Hay grand preocupación sobre las diferentes alternativas de reciclaje, debido a que estas tienen sus ventajas y limitaciones basado en aspectos como: características de los residuos, capacidad de procesamiento, costos de logística, calidad del producto final, entre otros [67]. En este estudio se tomaron en cuenta seis alternativas definidas anteriormente y se consideró un grupo de criterios los cuales fueron inspirados en los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* (ODS) ya que estos presentan la limitación para tener un desarrollo sostenible.

3.1.1 Contaminación

Como cualquier proceso industrial, las alternativas de reciclaje generan residuos y/o emisiones como CO₂ que pueden afectar el medio ambiente [67], por tal razón un criterio necesario corresponde a evaluar el proceso con menor grado de contaminación, ya que el objetivo principal de buscar alternativas de reciclaje es disminuir la contaminación y no aumentarla [67]. Este criterio fue inspirado en el ODS 13 (Acción por el clima) y ODS 14 (Vida submarina) [68].

3.1.2 Consumo de energía

Corresponde a la energía consumida (térmica/eléctrica) durante la ejecución del proceso [67], este factor indicara la viabilidad de un proceso respecto a costos de operación, un menor consumo mejora la utilidad y reduce problemas ambientales y de aprovechamiento de recursos naturales [66]-[67]. Este criterio fue inspirado en el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) [68].

3.1.3 Pasos del proceso

Por medio de la literatura, se determinó la facilidad del proceso de reciclaje de cada una de las alternativas, estableciendo los pasos necesarios en cada proceso, para determinar la cantidad de equipos (costos fijos) [66]-[67], teniendo en cuenta que entre más número de equipos más difícil es el control y mantenimiento de la planta. Este criterio fue inspirado en el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) [68].

3.1.4 Productos generados

Con el fin de generar el mayor grado de utilidad posible, evaluar el producto obtenido y si es posible, visualizar su precio en el mercado actual, brinda una nueva perspectiva en garantizar la calidad y las propiedades del material reciclado, Para ser posible venderlo a otras industrias generando un enfoque circular [67]-[69]. Este criterio fue inspirado en el ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico).

3.1.5 Aplicabilidad industrial

Debido a la alta oferta de residuos plásticos PET posconsumo y a la escasa cantidad de material reciclado, se debe observar la aplicabilidad a escala industrial es un criterio importante para la selección de este [68]-[70]. Este criterio fue inspirado en el ODS 12 (Producción y consumo responsable).

Tabla 5.

Criterios de proceso

CRITERIO	ASPECTO	OBJETIVO	ODS
Contaminación	Ambiental	Disminuir	13-14
Consumo de Energía	Ambiental	Disminuir	7
Pasos del proceso	Técnico	Disminuir	9
Valor del producto generado	Económico	Aumentar	8
Aplicabilidad industrial	Técnico	Aumentar	12

Nota. la tabla Muestra los criterios utilizados en este documento.

Los criterios seleccionados para el proceso de jerarquización analítica, fueron inspirados en artículos de previa revisión bibliográfica, en los cuales se evidenció una similitud respecto a estos y sus correspondientes pesos, que fueron calculados posteriormente en este documento, los artículos recuperados y analizados fueron: “*Prioritization of Plastic Recycling Process Using Analytical Hierarchy Process*” [66], “*Multi-criteria decision analysis (MCDA) method for assessing the sustainability of end-of-life alternatives for waste plastics: A case study of Norway*”[68] “*An analysis of barriers for plastic recycling in the Indian plastic industry*” [71] y

“Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty”[72].

3.2 Alternativas utilizadas de reciclaje químico para el estudio.

El reciclaje químico es un proceso complementario al mecánico, que ofrece diferentes posibilidades que permiten resolver las limitaciones de este último; es un proceso mediante el cual se produce la descomposición del polímero para obtener sus componentes [73], los cuales pueden ser usados como materia prima de otras industrias o generar un proceso de polimerización donde se pueden obtener nuevos materiales poliméricos [74]. Los diferentes procesos de reciclaje químico son mencionados a continuación.

3.2.1 Pirólisis

Es una tecnología adecuada para residuos que son difíciles de despolimerizar. El proceso es a temperaturas altas y en ausencia de oxígeno. Dicho proceso tiene tres etapas: la dosificación y alimentación de la materia prima para su transformación y la obtención y separación de los productos, el material se calienta a una temperatura entre los 400 °C – 800 °C en ausencia de oxígeno a una presión superior a la de la atmosfera [75], donde por medio de ciclones se separa el coque del gas, después el gas se condensa para generar aceite y el gas que no se condensa es pasado por un filtrado [76].

3.2.1.a Productos obtenidos.

Tabla 6.

Productos del proceso de pirólisis

Combustible líquido (aceite de pirólisis)	Se utiliza como combustible. Puede ser destilado para la obtención de fracciones de aceite, como gasolina, fracciones de Diesel y fuel oil, [77]
Carbono negro	Se utiliza como combustible sólido, para la fabricación de productos de caucho, se obtiene gran cantidad de este en la pirólisis del PET [78]
Gas	Se utiliza para mantener el proceso de pirólisis dentro de la planta y para calentar. 10 % a 25 % [79].

Nota. Productos del proceso de pirólisis. Tomado de: P. Ríos and M. Calvo, “Proyecto De Biocombustible: Planta De Pirólisis,” *Inst. Tecnológico Buenos Aires*, p. 167, 2011. [Online] Disponible: <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/768>

3.2.1.b Tecnología. la pirólisis es un proceso con un costo relativamente alto del que se puede obtener una amplia distribución de productos para los diferentes tipos de polímeros [80], sin embargo el proceso de separación es más complicado que el de gasificación [81], tecnología que actualmente no es aplicada para la resina PET debido a que el comportamiento del PET durante la pirólisis da lugar a la formación de sublimados sólidos de sustancias tales como el Ácido Tereftálico (TPA) y Acido Benzoico (BA), causando obstrucción y corrosión de las tuberías de las instalaciones de tratamiento [77].

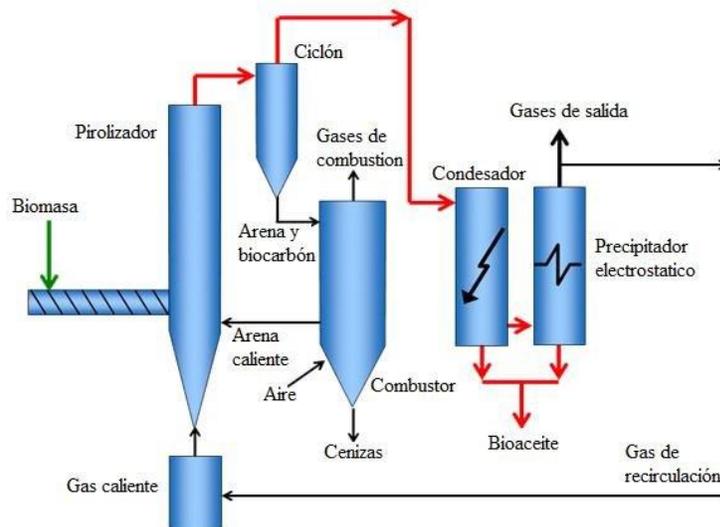
3.2.1.c Ambiente. la pirólisis surgió como un fuerte candidato para el tratamiento de residuos orgánicos, ya que los gases y aceites producidos podrían usarse como combustibles y energía, por lo tanto, proporcionaron un ahorro significativo de recursos sin un gran impacto en el cambio climático o en el espacio de los vertederos [82]. Esta técnica, no genera gases contaminantes como óxidos de nitrógeno y azufre, los que se producen en la combustión, asimismo todos los productos o subproductos generados pueden ser reutilizados y el proceso es autosuficiente con respecto a la energía. Sin embargo, a la hora de aplicar pirólisis al proceso del PET, este genera gran cantidad de dióxido de carbono e hidrocarburos policíclicos que son muy contaminantes para la salud y la vida humana [77]-[78].

3.2.1.d Energía. la mayor dificultad de la pirólisis es la gran cantidad de energía requerida en el proceso, ya que esto genera un aumento en el costo operativo, sin embargo, los gases producidos pueden ser usados para suplir una cantidad de energía del proceso [83].

3.2.1.e Aplicabilidad industrial. para la implementación de una planta de pirólisis, se requiere cantidades promedios de residuos para que se dé una mayor calidad del producto. En cuanto tecnologías se encuentran dos plantas ubicadas en Sevilla y Almería, España, propiedad de Plastics Energy [44] las cuales tienen una capacidad para procesar 5 000 ton/año de plástico (poliestireno, polipropileno y polietileno) [84]. Hasta ahora, la pirólisis ha sido la forma más común de reciclaje químico; otro ejemplo de aplicación es Agilyx que desde 2018 ha estado reciclando 10 toneladas/día de poliestireno (PS) en su planta [85].

Figura 9.

Diagrama del proceso de pirolisis



Nota. Esta imagen muestra el proceso de pirolisis. Tomado de: I. Montoya, “*pirolisis rápida de biomasa*”, Universidad Nacional De Colombia, 2015 [Online] Disponible: https://www.researchgate.net/publication/281976634_Pirolisis_rapida_de_biomasa

3.2.2 Gasificación

Este proceso está sujeto a la disponibilidad de un sustrato carbonoso, CO_2 y un agente gasificante (vapor de agua u oxígeno), generan una recombinación hacia hidrógeno molecular y monóxido de carbono denominado gas de síntesis de elevado poder calorífico, este gas se usa como base en la producción de amoníaco y metanol [86].

3.2.2.a Productos obtenidos. la composición de los gases obtenidos en este proceso es variada, pero en forma general los componentes principales del gas de síntesis producto de la gasificación del PET son: hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano y etileno [69]. Para el PET genera gran cantidad de hidrógeno y monóxido de carbono sin embargo genera CO_2 , por cada 100g de PET se genera un rendimiento del 95 % H_2 , 90 % CO_2 y 15 % CO [87].

3.2.2.b Tecnología. la gasificación es un proceso similar a la pirólisis y consiste en los mismos pasos solo que a este proceso se le adiciona vapor de agua, es una tecnología relativamente sencilla, que requiere altos volúmenes de materia prima para que sea factible, entre los 50 000-100 000

toneladas/anuales [44]-[69], en el caso de este proceso la cantidad de PET es baja ya que si se ingresara el 100 % de los residuos este sería un total de 5049 ton/año.

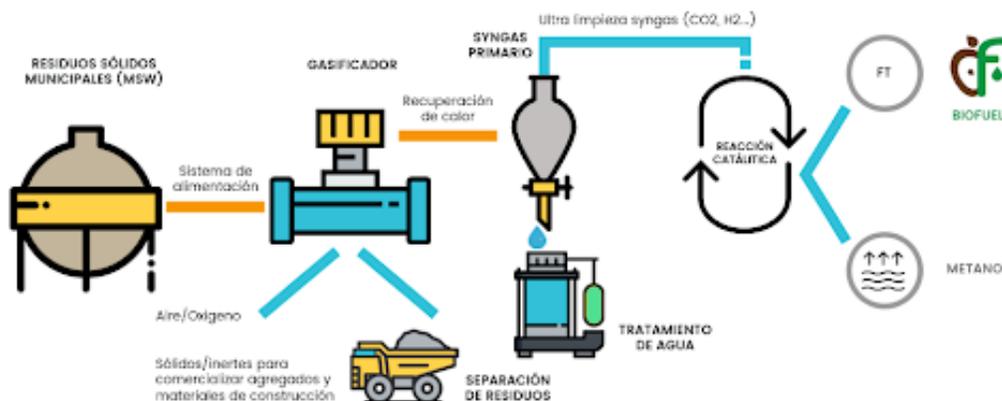
3.2.2.c Ambiental. la gasificación de materiales plásticos genera tanto combustibles líquidos como gaseosos, así como una cantidad representativa de residuo de carbono, que posteriormente deben ser tratados para no contaminar [32], otro problema de esta alternativa a nivel ambiental es la gran cantidad de uso de agua [88], en la gasificación se generan mayor cantidad de óxidos de nitrógeno y azufre a mayor temperatura mayor generación de estos compuestos [79], en la gasificación por cada 100 gramos de PET se genera un rendimiento de CO₂ de 90 %, lo cual es una gran cantidad de CO₂ que es perjudicial para la atmosfera [87].

3.2.2.d Energía. es necesario suministrar energía para mantener en aumento la temperatura del proceso. El gas de síntesis puede ser utilizado en diferentes maneras, pero la más común es generación de energía eléctrica [89], sin embargo, se necesita de mayor energía térmica temperatura entre los 500 °C - 900 °C, mayor que la requerida en el proceso de pirólisis temperatura entre los 300 °C - 600 °C [44].

3.2.2.e Aplicabilidad industrial. en la actualidad la gasificación a nivel industrial ha sido desarrollada por TEXACO en los países bajos de la Unión Europea, esta planta cuenta con una capacidad de 40 000-50 000 Ton/año de residuos plásticos, el crudo y gases condensables y no condensables se inyectan al gasificador [44]-[69]. Otra planta operativa a gran escala basada en tecnología de gasificación es propiedad de Enerkem, y se encuentra en Edmonton, Canadá. convierte 100 000 toneladas de residuos anualmente en 38 millones de biocombustibles [67].

Figura 10.

Diagrama del proceso de gasificación.



Nota. Esta imagen muestra el proceso de gasificación. Tomado de: waste2biofuel, «waste2biofuel,» abril 2015. [En línea]. Available: <http://lifewaste2biofuel.eu/proyecto-lifewaste2biofuel-proceso/>.

3.2.3 Incineración

La incineración es una tecnología de tratamiento de residuos que implica la quema de los residuos sólidos, convirtiendo materiales de desecho, incluyendo papel, plásticos, gomas, maderas, restos de comida entre otros, en cenizas, gases de combustión, contaminantes de aire y de las aguas residuales [90]. En la incineración se realiza el secado cuando el residuo entra en el horno, se calienta por medio del aire precalentado, la humedad es eliminada en el rango de temperaturas de 50 a 100 °C.. luego el residuo sufre una descomposición térmica de los materiales orgánicos, generando materia volátil, que constituye el 70-90 % de los residuos sólidos urbanos [91]. La volatilización se produce en un amplio intervalo de temperaturas entre 200-750 °C, por último, se da la combustión de volátiles, donde los compuestos volátiles se queman inmediatamente, porque la temperatura de la caldera se encuentra entre 750-1 000 °C, que es muy superior a la temperatura de ignición de los volátiles derivados de residuos [91].

3.2.3.a Producto obtenido. la energía producido por una empresa llamada Afval Energie Bedrijf CHP, procesa 1,5 millones de toneladas por año de una mezcla de plásticos genera 114 MW [92], el proceso se utiliza para generar electricidad a través de generadores de turbina o para calentar

viviendas y edificios industriales. Aunque los polímeros son fuentes de energía de alto rendimiento, siguen siendo inaceptables desde un punto de vista ecológico [93]

3.2.3.b Tecnología. la incineración es uno de los tratamientos ampliamente utilizada para el tratamiento de residuos, sin embargo, exige mano de obra calificada para la supervisión y operación de los incineradores, la tecnología tiene problemas operacionales debido a la variabilidad de la composición de los residuos puede causar problemas de manejo y de operación del incinerador, e inclusive exigir un mantenimiento más intenso [94].

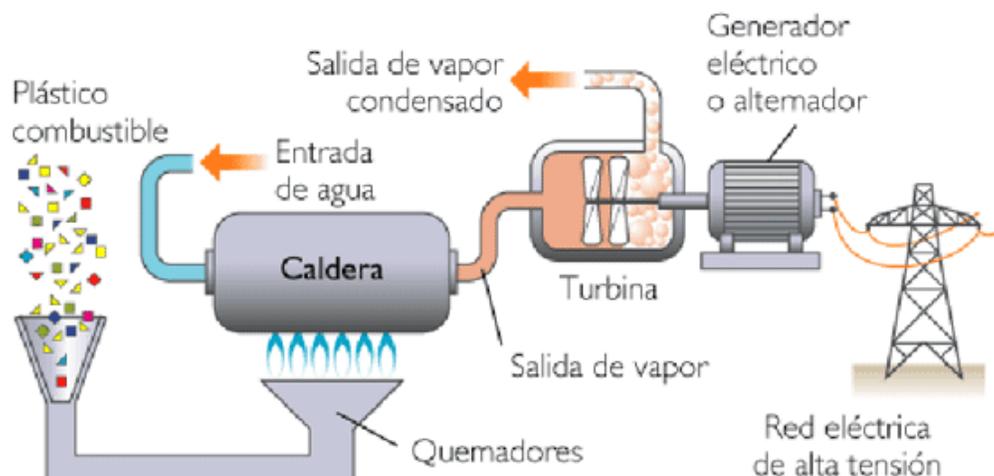
3.2.3.c Ambiental. los riesgos para la salud que plantean por las sustancias tóxicas en el aire que producen, incluidas las dioxinas gases ácidos. La desventaja de la combustión de los plásticos, es la contaminación del aire debido a los peligrosos humos emitidos en la atmósfera [95]. Los plásticos, derivados de fuentes fósiles, constituyen una proporción significativa del material quemado en incineradoras de residuos municipales, el nivel de CO₂ fósil se estima en alrededor de 2,7 ton de CO₂ por tonelada de mezcla de plástico [96].

3.2.3.d Energía. la energía producida en la combustión se transfiere a los gases de combustión para la generación de electricidad [97], la energía implementada en el proceso se recupera Muchos plásticos pueden arder y servir de combustible por ejemplo 1 kg de PET aporta igual energía que 1 kg de carbón el cual es de 2 kwh [98], y además reducir los costes de explotación de las propias plantas de incineración. El proceso inicial se realiza a 900 °C.

3.2.3.e Aplicabilidad industrial. en Europa existen decenas de incineradores de residuos sólidos municipales con recuperación de energía. La mayor parte de ellos tiene capacidad a partir de 200 t/día (7 2000 ton/año), para industrias con gran capacidad, posiblemente en el rango de 1 000 t/día [94], la empresa Afval Energie Bedrijf introduce una mezcla de plásticos en las que se encuentra el PET, se considera que entre más cantidades mayor generación de energía.

Figura 11.

Diagrama del proceso de incineración.



Nota. Esta imagen muestra el proceso de gasificación. Tomado de: E. Cardenas, "Reciclaje de envases y botellas de polipropileno," Julio 2014. [En línea]. Available: http://reciclajedebotellasypropileno.blogspot.com/2014/07/reciclajeenergetico_13.html.

3.2.4 Hidrólisis

Existe la hidrólisis ácida, alcalina y neutra para tratar el PET, sin embargo, la hidrólisis ácida del PET implica el uso de un ácido inorgánico fuerte, como el ácido nítrico o ácido sulfúrico, para despolimerizar el PET en un pH de 2 a 6. El producto de la reacción es, entre otros, el ácido tereftálico crudo, que se debe purificar por medio de la formación de su sal de sodio [99].

3.2.4.a Productos obtenidos. los procesos de hidrólisis pueden variar según el agente oxidante que se utilice (neutral, ácida o alcalina), sin embargo, los productos cambian ligeramente, en este trabajo se enfoca la hidrólisis ácida puesto que presenta condiciones suaves de operación respecto a presión y temperatura[100] , la hidrólisis ácida opera a 80 °C-95 °C y a presión atmosférica, mientras que la hidrolisis alcalina y neutra opera entre los 180°-275 °C y presiones entre 1-4 Mpa [101]. Este proceso genera ácido tereftalico y etilenglicol, compuestos primordiales en la fabricación del PET, el óxido de nitrógeno que se forma en el sistema se recicla por oxidación y la adición de agua para formar HNO₃ [100]. La siguiente tabla muestra el precio de los principales productos.

Tabla 7.

Precios productos del proceso de Hidrólisis

Producto	Precio
Ácido tereftálico	1445 \$ USD/ Ton
Etilenglicol	53,05 \$ USD/Litro
Ácido nítrico	229 \$ USD/Ton

Nota. Muestra los precios de los productos de la hidrólisis.

Tomado de: ICIS, “*Purified Terephthalic Acid (PTA)*

Prices and Pricing Information,” Independent Commodity

Intelligence Services, 2011.

3.2.4.b Tecnología. un proceso involucra una gran cantidad de costos, sobre todo en la fase de separación, ya que demanda muchas materias primas que aumentan significativamente el costo de producción y por ende se crea un sobrecosto de los productos que va muy por encima de los precios del mercado. Además, la hidrólisis ácida incrementa la disolución de impurezas, las que requieren procesos posteriores de purificación de los monómeros obtenidos [99].

3.2.4.c Ambiental. debido a las condiciones ácidas o básicas de la hidrólisis, esta puede generar mayores problemas ambientales [99], ya que generalmente tiene el problema de la corrosión. Aunque el H_2SO_4 es el ácido de uso común, tiene el problema adicional de producir un gran volumen de desechos líquidos que contiene sales inorgánicas y trazas H_2SO_4 . [100].

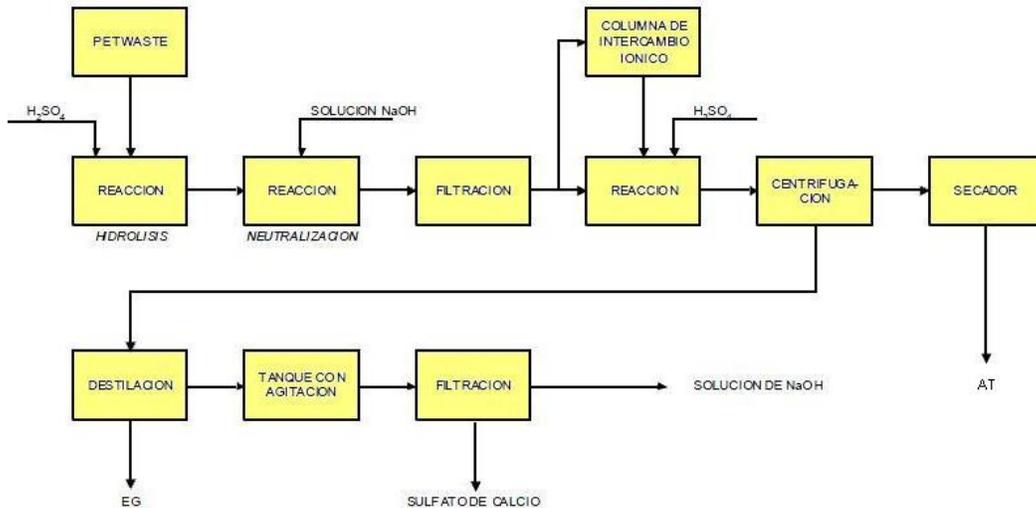
3.2.4.d Energía. la fase reactiva del proceso requiere de temperaturas relativamente bajas como se mencionó anteriormente entre 80 °C - 95 °C [100] Por lo que los costos energéticos no son altos, sin embargo los procesos de separación igualmente requieren de energía; por lo cual se genera un aumento en los costos operativos.

3.2.4.e Aplicabilidad industrial. los procesos de reciclaje químico aumentan su valor cuando se gestionan grandes cantidades de material, sin embargo, en el proceso de hidrólisis, debido a las altas condiciones de operación no es recomendable tener una alta capacidad de materia prima ya que aumentan costos de energía, servicios públicos, personal, productos químicos, gestión de residuos y gastos generales. Según diversas fuentes, la cantidad recomendada es de 200 ton/año [104], la hidrólisis ácida del PET no se usa a nivel industrial debido al gran consumo de ácidos que

trae como consecuencia problemas de efluentes; de igual forma, es necesario invertir en materias resistentes a la corrosión [105].

Figura 12.

Diagrama del proceso de hidrólisis.



Nota. Esta imagen muestra el proceso de hidrólisis, tomado de: Omar Alí Blandón Cruz, “Evaluación del Proceso de Reciclaje de Polímeros Matagalpa 2012” Univ. Nac. Auton. Nicar. unan farem matagalpa, pp. 1–15, 2013. [Online] Disponible: <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/7043>

3.2.5 Metanólisis

La despolimerización del Plástico a través de la metanólisis se lleva a cabo por medio del tratamiento del polímero con altas cantidades de metanol en presencia de un catalizador (trisopropóxido de aluminio o acetato de zinc y sales de ácido arilsulfónico) a altas presiones (284,46- 355,5 psi) y a temperatura (180-280°C). Este proceso se utiliza generalmente para PET coloreado y con contenidos de otros polímeros contaminantes. [99]

3.2.5.a Productos obtenidos. a diferencia del proceso de hidrólisis, con el proceso de metanólisis se obtienen dimetil tereftalato y etilenglicol, Estos productos se reciclan al proceso de transesterificación de la producción de PET [106], el precio aproximado de etilenglicol es de 53,05 \$ USD/Litro Para el caso del dimetil tereftalato el precio aproximado es de 45,3\$ USD/kg. Estos valores pueden cambiar según la pureza y el estado del mercado del producto[107].

3.2.5.b Tecnología. este proceso incluye un alto número de operaciones unitarias, como la filtración (centrífuga), cristalización multietapa, destilación al vacío, etc; sin embargo, presenta algunas ventajas sobre los procesos de hidrólisis y glucólisis; por ejemplo, sencillos pasos de purificación [106]. Las desventajas del método incluyen la asociación de alto costo atado con la separación y refinado de la mezcla de los productos de reacción (glicoles, alcoholes y derivados de ftalato) [108].

El proceso de metanólisis, que es una forma de transesterificación, procede eficazmente en presencia de catalizadores. La literatura de patentes da a conocer catalizadores útiles para la metanólisis de PET, como el acetato de zinc, sales de manganeso (acetato y fosfato), calcio fosfatos, óxidos e hidróxidos de metales alcalinos [106].

3.2.5.c Ambiental. el proceso genera efluentes de baja peligrosidad, puesto que el etilenglicol y el metanol se pueden recuperar y reciclar fácilmente [109]; sin embargo, el proceso requiere de condiciones de operación temperatura y presión relativamente altas (180-280 °C), (20–40 atm) [5]. Los procesos de purificación del dimetil tereftalato se emplean para eliminar impurezas críticas que tendrán un impacto negativo en su comportamiento de re-polimerización. Estas impurezas incluyen agua, glicoles, alcoholes y catalizadores de metales pesados [5], por lo cual se pueden generar problemas ambientales si no se tratan estas corrientes de desecho.

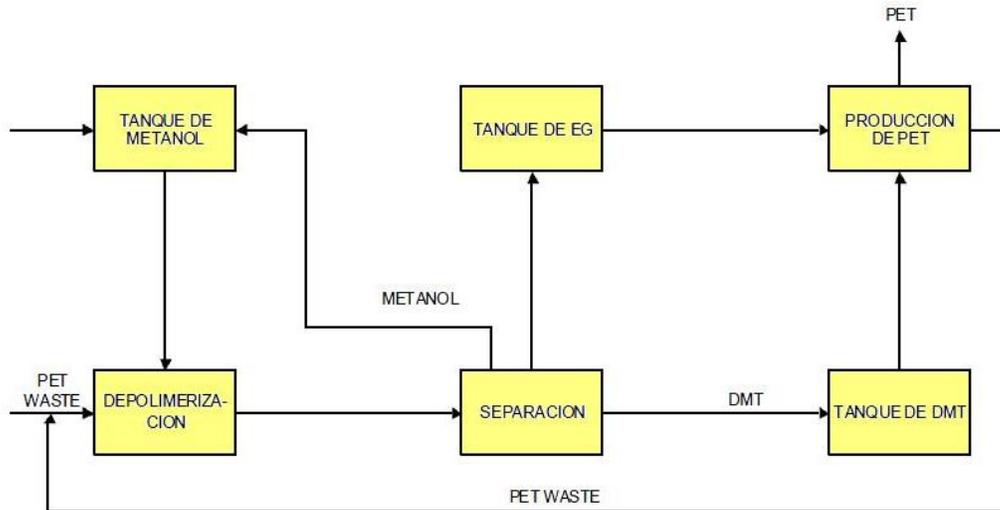
3.2.5.d Energía. El proceso de Metanólisis requiere de unas condiciones de temperatura y presión elevadas (180-280 °C), (20–40 atm), [5] si bien un poco menor a la hidrolisis; sigue siendo valores considerables, por tal razón el coste energético requerido es alto, de igual forma el proceso de separación del dimetil tereftalato es complejo y se requiere equipos de separación que consumen energía. [110]

3.2.5.e Aplicabilidad industrial. Para hacer el reciclaje químico de botellas de PET posconsumo mediante la ruta de Metanólisis económicamente factible, es recomendable trabajar 20 000 a 40 000 toneladas de botellas de PET posconsumo al año [111]. En consecuencia, las plantas de reciclaje deben instalarse en áreas que sean capaces de cobrar la cantidad requerida [92]. Eastman planea reactivar su tecnología de Metanólisis para reciclar tereftalato de polietileno (PET). Eastman utilizará la mayor parte de la producción de la planta para producir co-poliésteres especiales [85], Eastman a utilizado este proceso por 25 años, la metanólisis resulta más avanzada

que la hidrólisis y la metanólisis sin embargo requiere de complicados pasos de cristalización y destilación lo que a su vez demanda altos costos de inversión y operación [112].

Figura 13.

Diagrama del proceso de metanólisis.



Nota. Esta imagen muestra el proceso de metanólisis, tomado de: Omar Alí Blandón Cruz, “Evaluación del Proceso de Reciclaje de Polímeros Matagalpa 2012” Univ. Nac. Auton. Nicar. unan farem matagalpa, pp. 1–15, 2013. [Online] Disponible: <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/7043>

3.2.6 Glicólisis

La glicólisis es una reacción de transesterificación de residuos de PET con exceso de glicol en el rango de temperatura (180-240 °C) en presencia de catalizador para producir tereftalato de bis (2-hidroxietilo) (BHET), polímero intermediario en la producción de PET. Este método implica la ruptura de enlaces de éster de PET por un glicol (EG, DEG, y PG) para producir BHET, dímero y oligómeros [100].

3.2.6.a Productos obtenidos. los principales productos obtenidos en este proceso son el (BHET) y el tereftalato de bis (2-hidroxipropil) (BHPT), generalmente, este último no tiene un valor actual en el mercado ya que se emplea en la misma formación del PET por lo cual está presente en la misma planta de producción de PET. El precio aproximado del BHET es de 190\$ USD/Lb [113], en la fabricación de poliésteres insaturados, espumas de poliuretano [108].

3.2.6.b Tecnología. el proceso de glicólisis presenta cinéticas de reacción lenta, por tal razón, con el objetivo de aumentar la velocidad de reacción y el rendimiento es conveniente el uso de catalizadores; los más usados son metales orgánicos como $Zn(OAc)_2$. [100]. El proceso se realiza a altas temperaturas 195 °C - 210 °C, por lo cual es necesario un reactor con la capacidad de soportar estas condiciones de operación y lograr una buena área superficial en la distribución del catalizador.

Los procesos de separación presentan varias alternativas; la primera es, extracción con agua caliente, seguida de cristalización a 4 °C; como segunda opción, destilación al vacío de la mezcla, el EG obtenido se puede reutilizar en un nuevo proceso de glucólisis. Finalmente, también se pueden emplear sistemas de evaporación de dos etapas para separar y purificar productos de glicólisis [112].

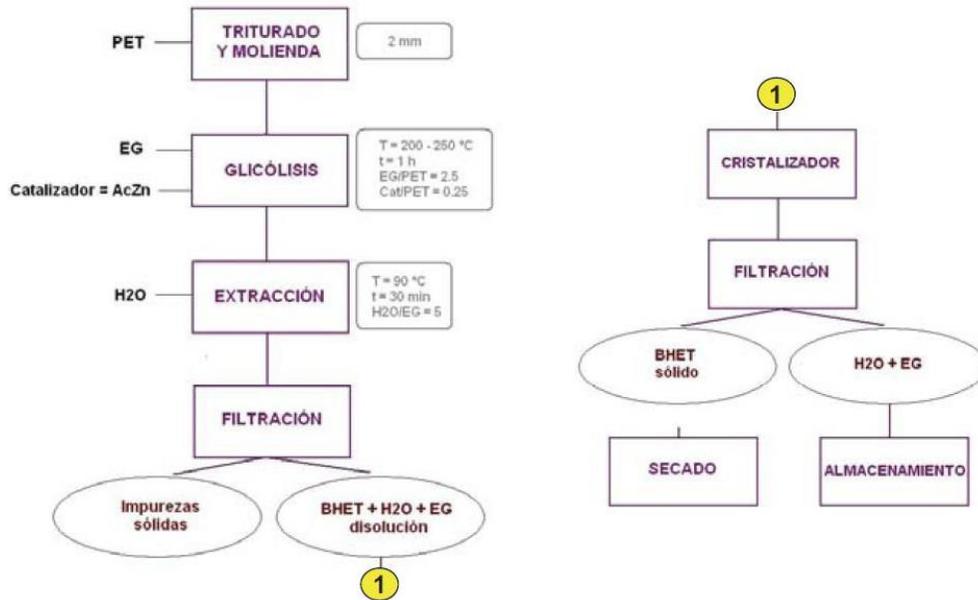
3.2.6.c Ambiental. los productos de este proceso de despolimerización, si no se purifican lo suficiente, no pueden erradicar contaminantes como residuos de catalizadores, aditivos, tintes, etc. asociados con él [100], por lo cual pueden terminar siendo retirados en forma de efluentes, que afecta el medio ambiente y contrapone las regulaciones respecto a manejo de efluentes industriales. Sin embargo, el proceso puede considerarse ecológico, porque todos los productos químicos utilizados (con reciclaje de glicoles y catalizadores, etc.) y los productos no son tóxicos ni corrosivos [100].

3.2.6.d Energía. el requerimiento energético del proceso está muy ligado a la elección del catalizador, ya que este afecta el tiempo de reacción y por ende el tiempo de calentamiento en el reactor; de ser el caso requerido una recuperación de catalizador generalmente se hace mediante destilación a vacío lo cual aumenta considerable los costos energéticos del sistema. [114] de igual forma la selección del catalizador afecta el proceso de separación; puede requerir procesos menos complicados [114]. y así disminuir costos de energía en la utilización de estos equipos.

3.2.6.e Aplicabilidad industrial. actualmente la glicólisis es un proceso que está en desarrollo de aplicación, la glicólisis se ha convertido en uno de los procesos más viables en el reciclado químico las ventajas de este método es la baja inversión de capital [112], las empresas Axens, IFPEN y JEPLAN han firmado recientemente un acuerdo de desarrollo y comercialización conjunto para desarrollar, demostrar y comercializar un proceso innovador de reciclaje de monómeros de PET para todo tipo de materiales de desecho basados en PET donde implica una despolimerización optimizada de PET basada en glicólisis [115]. La capacidad instalada más recomendada es de 20 000 kg [116] en un proceso tipo batch, se puede considerar un escalamiento industrial hasta de 14 400 ton/año [116].

Figura 14.

Diagrama del proceso de glicólisis.



Nota. Esta imagen muestra el proceso de glicólisis, tomado de: Omar Alí Blandón Cruz, “Evaluación del Proceso de Reciclaje de Polímeros Matagalpa 2012” Univ. Nac. Auton. Nicar. unan farem matagalpa, pp. 1–15, 2013. [Online] Disponible: <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/7043>

3.3 Matriz evaluación de proceso

Todo proceso de decisión tiene su inicio en la identificación de un problema y el establecimiento de las posibles soluciones para el mismo [117], donde se utilizan criterios como referencia. Para la solución del problema, se desarrollan técnicas matemáticas que permiten identificar la solución

óptima del mismo. Para buscar la solución de un problema, hay múltiples criterios que se pueden seleccionar dependiendo de cuales el investigador considere más importantes para la solución de éste. Los multicriterios se dividen en:

Multicriterio discreto: son aquellos en los que existe un conflicto entre múltiples criterios, en los que el conjunto de alternativas a considerar por parte del decisor es finito y normalmente no muy elevado [118].

Multicriterio continuos: se caracterizan por que el decisor considera un número infinito de alternativas [118].

Para este trabajo investigativo los métodos de interés son los de multicriterio discreto ya que las alternativas a considerar son finitas, entre los métodos de esta categoría se encuentra:

- método de ponderación de Gass y Saty [117].
- Método Electre [118].
- Método axiomático de Arrow-Raynaud [118].
- Método jerarquización AHP [118].

Para el desarrollo de la matriz de este trabajo se decidió emplear el método de jerarquización AHP, este método fue desarrollado por *Thomas L. Saaty* donde busco la elaboración de un instrumento formal para la evaluación y selección de alternativas, que permite organizar las alternativas de la mejor a la peor y permite determinar los pesos de cada criterio [119]. El proceso de jerarquización AHP se presenta en tres (3) etapas:

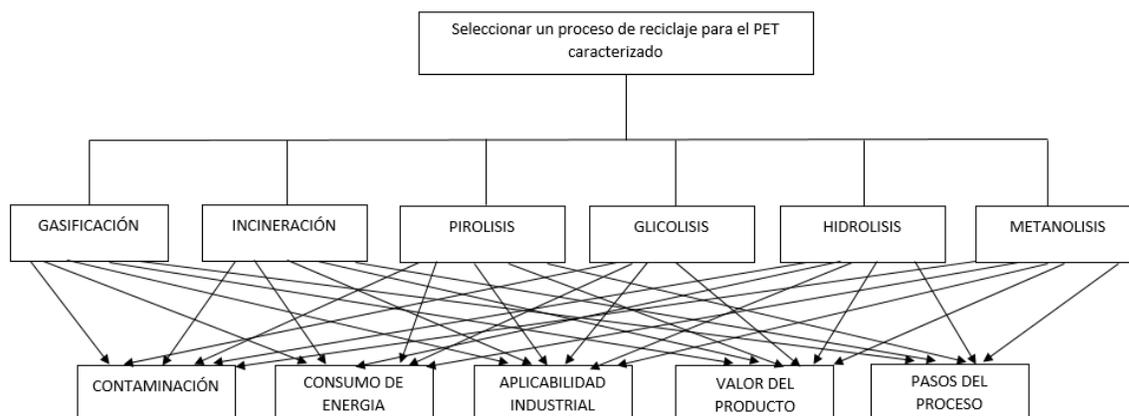
1. representación o formulación del problema [117].
2. evaluación de criterios y alternativas [117].
3. por último, la jerarquización y selección de la mejor alternativa que conlleve al cumplimiento del objetivo de toma de decisión [117].

3.3.1 Desarrollo de la matriz

Para el desarrollo de la matriz, lo primero que se realiza es un bosquejo definiendo un problema, las alternativas y por último los criterios.

Figura 15.

Bosquejo del problema con sus posibles soluciones y criterios



Nota. Bosquejo del problema con las posibles soluciones y criterios a evaluar

Después de la elaboración del bosquejo, se asignarán valores a los criterios y alternativas a través de la comparación por pares, donde se establece juicios de valor sobre la importancia relativa que para él investigador tienen los criterios, así como la importancia de dichos criterios en las alternativas [119]. Los resultados quedan plasmados en matrices de comparaciones binarias o por pares, en las que se puede ver la importancia de un criterio frente a otro, la escala de valor que es utilizada es la de Saaty la cual se muestra a continuación [119]:

Tabla 8.

Escala de valor de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	Ambos criterios son de igual importancia
3	Débil o moderada importancia de uno sobre otro
5	Importancia esencial o fuerte de un criterio sobre otro
7	Importancia demostrada de un criterio sobre otro
9	Importancia absoluta de un criterio sobre otro
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes que se emplea cuando es necesario un término medio entre dos
2	Entre igual y moderada preferencia
4	Entre moderada y fuerte preferencia
6	Entre fuerte y extremadamente preferible
8	Entre muy fuerte y extremadamente preferible

Nota. La tabla muestra la valorización escala de Saaty. Tomado de: T. Saaty, "How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process," *J. Appl. Anal.*, vol. 24, no. 6, p. 25, 1994.

3.3.2 Peso de los criterios

Para darle peso a los criterios, primeramente se realiza una matriz que está compuesta por los criterios valorizados por los valores de Saaty que el investigador consideró, seguido de esta calificación valorativa se hace la suma por columnas [119]. El procedimiento detallado de la valorización se puede observar en el **Anexo 1**.

Tabla 9.

Matriz A: valorización de criterios

	Consumo de energía	Contaminación	Valor del producto	Pasos del proceso	Capacidad instalada
Consumo de energía	1	1/3	5	3	3
Contaminación	3	1	3	7	5
Valor del producto	1/5	1/3	1	5	2
Pasos del proceso	1/3	1/7	1/5	1	1/3
Capacidad instalada	1/3	1/5	1/3	1/2	1
Suma	4,8	2	9,53	16,5	11,33

Nota. Esta matriz muestra el valor que se le dio a cada criterio con la escala de Satty.

En la matriz A se realizó la valorización de los criterios uno frente del otro, como ejemplo podemos tomar el criterio ambiental en el cual se le dio un valor de 3 frente al criterio del valor del producto, esto quiere decir que para los investigadores el criterio ambiental es de mayor importancia frente al criterio del valor del producto. En la fila donde se encuentra el criterio de valor del producto frente a la columna de contaminación se coloca el inverso del valor que se dio en la fila de ambiente frente a la columna del valor del producto, ya que es de menor importancia frente al otro.

Luego de realizar la valorización de la matriz se realiza la normalización de la matriz A y se realiza un promedio ponderado por filas para saber los pesos de los criterios [119].

Tabla 10.

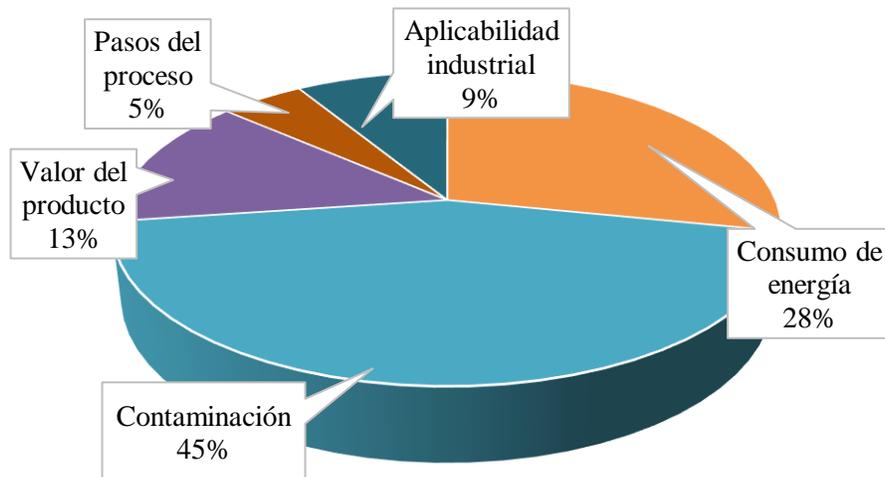
Matriz B: Normalización pesos de criterios

	Consumo de energía	Contaminación	Valor del producto	Pasos del proceso	Capacidad instalada	Suma Pesos
Consumo de energía	0,21	0,17	0,52	0,18	0,26	0,28
Contaminación	0,62	0,50	0,31	0,42	0,44	0,45
Valor del producto	0,04	0,16	0,10	0,30	0,18	0,13
Pasos del proceso	0,07	0,07	0,02	0,06	0,03	0,05
Capacidad instalada	0,07	0,10	0,03	0,03	0,09	0,09

Nota. La tabla muestra la normalización de los pesos de los criterios evaluados

Figura 16.

Pesos de los criterios obtenidos



Nota. La figura muestra el peso de los criterios. Elaborado mediante el método de AHP

Luego de la definición de los pesos de los criterios es necesario validar que la matriz A de valorización de los criterios es coherente, esto se realiza desarrollando los siguientes pasos:

Paso 1:

Se hace una multiplicación de la matriz (A) de los criterios valorizados con los pesos de los criterios [119] donde nos dio como resultado un vector

Matriz A valorización de los criterios					Matriz C Peso criterios	Matriz D Vector
1	1/3	5	3	3	0,28	1,55
3	1	3	7	5	0,45	2,40
1/5	1/3	1	5	2	0,13	0,74
1/3	1/7	1/5	1	1/3	0,05	0,25
1/3	1/5	1/3	1/2	1	0,09	0,32

Paso 2:

Cada fila del vector resultante se dividió sobre el peso de los criterios, después de realizar dicha división se saca el promedio ponderado el cual es λ_{max} [119], que se explicara posteriormente.

Matriz D/Matriz C

1,55	
2,40	
0,74	
0,25	
0,32	
PONDERADO VECTOR	5,17

Paso 3:

Se realiza un cálculo denominado razón de consistencia por medio de una serie de ecuaciones mostradas posteriormente, dicho valor de consistencia fue hallado para identificar si el investigador evaluó los criterios con coherencia. Esta razón de consistencia tiene que dar menor o igual a 0,1

para que sea coherente la valorización hecha en la matriz A, de no ser así se debe volver a evaluar la matriz y repetir todos los pasos nuevamente [119].

Ecuación 1.

Índice de consistencia de la matriz.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{donde } n = \# \text{ criterios}$$

Ecuación 2.

Índice de aleatoriedad de la matriz.

$$IA = 1,98 * \frac{(n-2)}{n}$$

Ecuación 3.

Razón de consistencia de la matriz.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Como se mencionó anteriormente, la coherencia se determina por medio de la relación del índice de consistencia el cual mide cuanto el investigador se ha alejado del valor ideal si dicho valor es cero, es porque la valorización de la matriz es totalmente consistente, y entre el índice de aleatoriedad el cual es el valor que tendría el índice de consistencia si los valores de la matriz se obtuvieran de manera completamente aleatoria[122].

Definición de términos:

- **índice de consistencia:** mide la consistencia de la matriz de comparaciones [123]-[124].
- **λ_{max} :** es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones [123]-[124].
- **n:** número de criterios [123].
- **índice de aleatoriedad:** índice de consistencia de una matriz recíproca aleatoria [123].

Como se puede observar la razón de consistencia de la matriz evaluada para los criterios dio como resultado 0,03 es decir que dicho resultado fue menor a 0,1 por lo tanto los valores que se dio por parte del investigador a cada uno de los criterios si tienen coherencia, de no ser así se volvería evaluar la matriz nuevamente.

$$IC = 0,04$$

$$IA = 1,18$$

$$RC = 0,03$$

3.3.3. Valorización a cada alternativa

Luego de realizar el peso de cada criterio se debe realizar el mismo procedimiento anterior para las alternativas, valorizando estas alternativas con respecto a cada criterio a continuación se observa los pesos de cada alternativa respecto a cada criterio, el procedimiento de valorización se presenta en el **Anexo 2**.

Ambiental	PESO
PIROLISIS	0,04
INCINERACIÓN	0,07
GASIFICACIÓN	0,09
GLICOLISIS	0,42
HIDROLISIS	0,13
METANÓLISIS	0,25

IC	0,14
IA	1,32
RC	0,08

Valor producto	PESO
PIROLISIS	0,15
INCINERACIÓN	0,22
GASIFICACIÓN	0,39
GLICOLISIS	0,11
HIDROLISIS	0,06
METANÓLISIS	0,07

IC	0,15
IA	1,32
RC	0,10

Aplicabilidad industrial	PESO
PIROLISIS	0,19
INCINERACIÓN	0,39
GASIFICACIÓN	0,25
GLICOLISIS	0,06
HIDROLISIS	0,03
METANÓLISIS	0,09

IC	0,15
IA	1,32
RC	0,10

Pasos del proceso	PESO
Pirolisis	0,21
INCINERACIÓN	0,06
GASIFICACIÓN	0,40
Glicólisis	0,11
HIDROLISIS	0,04
METANÓLISIS	0,18

IC	0,15
IA	1,32
RC	0,10

Energía	PESO
Pirolisis	0,04
INCINERACIÓN	0,35
GASIFICACIÓN	0,23
Glicólisis	0,18
HIDROLISIS	0,10
METANÓLISIS	0,12

IC	0,15
IA	1,32
RC	0,10

Finalmente, luego de sacar el peso de cada alternativa respecto a cada criterio se realiza la ponderación de los pesos obtenidos de las alternativas con los pesos obtenidos de los criterios, con el fin de obtener el peso de las alternativas, se realiza la ponderación como se muestra en la siguiente ecuación [119].

Ecuación 4.

Ponderado del peso de cada alternativa

$$Peso_{alternativa} = \sum_{salida} filadealternativa * filadesodecriterio$$

Tabla 11.

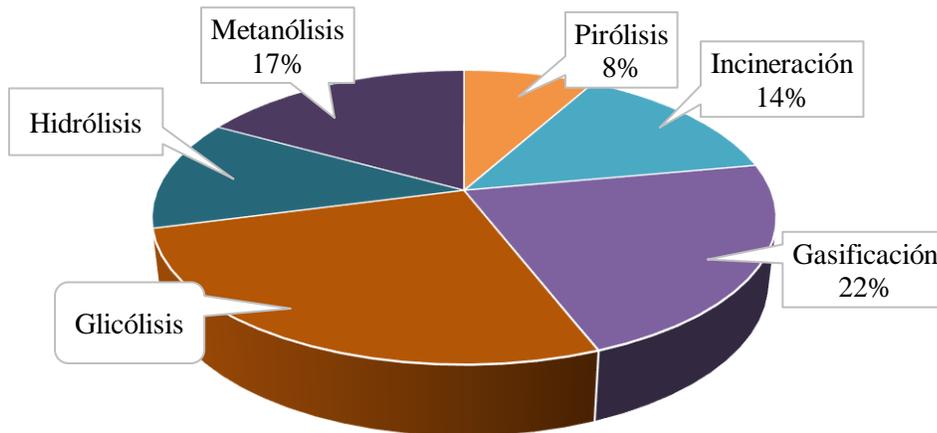
Pesos de las alternativas estudiadas

Pesos (alternativas por criterio)	Energía	Ambiental	Valor del producto	Pasos del proceso	Capacidad instalada	Peso alternativas
Pirólisis	0,04	0,04	0,15	0,21	0,19	0,08
Incineración	0,35	0,07	0,22	0,06	0,39	0,20
Gasificación	0,23	0,09	0,39	0,40	0,25	0,21
Glicólisis	0,18	0,42	0,11	0,11	0,06	0,25
Hidrólisis	0,18	0,13	0,06	0,04	0,03	0,11
Metanólisis	0,10	0,25	0,07	0,18	0,09	0,17
Peso criterios	0,28	0,45	0,13	0,06	0,10	

Nota. La tabla Muestra los pesos de cada una de las alternativas.

Figura 17.

Pesos de las alternativas



Nota. La figura muestra el Peso de las alternativas obtenidas mediante el método AHP

3.4 Análisis de los resultados obtenidos

En el procedimiento realizado anteriormente, se evaluó la matriz para determinar así los criterios que se consideran más importantes, en el que se obtuvo los resultados observados en la figura (10), donde el criterio con mayor importancia es el ambiental, ya que lo que se desea es beneficiar al medio ambiente con esta propuesta y no afectarlo más, por tal motivo a la hora de definir cada alternativa se tuvo en cuenta si dichas alternativas generaban residuos y que tipo de residuos estaban produciendo; el segundo criterio con mayor importancia es el consumo energético, este es importante debido a que esto puede generar un alto costo operativo a la empresa que dese implementar la tecnología sin embargo viene a jugar el tercer criterio de importancia el cual es el producto generado ya que si bien es de gran relevancia la energía tratando siempre de escoger el que menor consumo energético requiera se puede tener en cuenta el tercer criterio el cual es el producto que genera la alternativa y ver si este producto generado equilibra el consumo energético.

En cuanto a la selección de la mejor alternativa por medio de la matriz de jerarquización (AHP), la primera alternativa que muestra dicho método es el proceso de glicólisis, para esta alternativa se requiere de un consumo intermedio de energía frente a las otras alternativas, hay que tener en cuenta que este consumo energético se puede ver reducido por las condiciones de operación ya que es posible agregar un catalizador o realizar un calentamiento por microondas para disminuir el tiempo de operación, hablando no solo de como el consumo de energía disminuiría en el proceso, la glicólisis es la mejor alternativa en cuanto a la parte ambiental ya que los residuos que genera como lo son los colorantes del PET, y tazas del glicol empleado en el proceso pueden realizar un tratamiento de estos para no contaminar el suelo, esta alternativa también fue considerada mejor a nivel ambiental ya que no genera gases tóxicos a la atmósfera los cuales son más difíciles de tratar, el producto generado por medio de la glicólisis es el monómero BHET el cual brinda la posibilidad de fabricar resinas de poliéster, espumas de poliuretano, capas de mármol o para fabricar nuevamente botellas PET, finalmente en cuanto a los pasos del proceso requiere de varios procesos de separación más sencillos que la metanólisis y la hidrólisis lo cual la hace una de las alternativas con gastos de inversión relativamente bajos.

3.5 Potencial económico alternativa seleccionada

Se define como potencial económico ingresos de los productos menos los gastos de las materias primas permitiendo calcular la factibilidad económica de un determinado proceso, este cálculo se realiza de forma rápida para tomar la decisión de continuar con el proyecto si existe un potencial favorable [143].

Se calculó el potencial económico de cada proceso para lograr establecer la viabilidad económica de cada alternativa respecto a productos-reactivos, se indagaron los precios industriales y se estimó el potencial de acuerdo con la reacción deseable. La tabla 12 presenta los precios, así como el potencial obtenido.

Tabla 12.

Potencial económico alternativas reciclaje químico del PET

REACCIÓN GLICÓLISIS	$PET + 7,6 C_2H_6O_2 \xrightarrow{Na_2CO_3 (1:100)} C_{12}H_{14}O_6$
BHET (tereftalato de bis (2-hidroxiethyl))	97,15 USD/kg [125]
Etilenglicol	50,82 USD/kg [126]
Carbonato de sodio	47,55 USD/kg [127]
PET (recolección)	0,27 USD/kg [127]
POTENCIAL ECONÓMICO	675, 55 \$ USD/kmol BHET
REACCIÓN PIRÓLISIS	$1PET \rightarrow 2C_7H_6O_2 + 2CO_2 + 2C + C_2H_4$
PET (recolección)	0,27 USD/kg [128]
Combustible GLP 1°C /0,53g	3,5 USD/kg [129]
Ácido Benzoico	13 USD/kg [130]
Etileno	2,10 USD/kg [131]
CO ₂	4 USD/kg [132]
POTENCIAL ECONÓMICO	620,054 USD/kmol Acido benzoico
REACCIÓN GASIFICACIÓN	$PET + 6O_2 \rightarrow 4CO + 6CO_2 + 4H_2$
Oxígeno	25 USD/kg [133]
PET (recolección)	0,27 USD/kg [128]
CO ₂	4 USD/kg [132]
CO	16 USD/kg [134]
H ₂	14 USD /kg [135]
POTENCIAL ECONÓMICO	605,32 USD/kmol Gases combustibles
REACCIÓN INCINERACIÓN	$PET + 10 O_2 \rightarrow 10 CO_2 + 4H_2O$
Oxígeno	25 USD/kg [133]
PET (recolección)	0,27 USD/kg [128]
CO ₂	4 USD/kg [132]
POTENCIAL ECONÓMICO	369,48 USD/kmol CO ₂
REACCIÓN HIDRÓLISIS	$PET + H_2O \xrightarrow{H_2SO_4} C_8H_6O_4 + C_2H_6O_2$
H ₂ SO ₄	89 USD/kg [136]
PET (recolección)	0,27 USD/kg [127]
C ₈ H ₆ O ₄	90 USD/kg [137]
Etilenglicol	50,82 USD/kg [126]
POTENCIAL ECONÓMICO	629,20 USD/kmol C ₈ H ₆ O ₄
REACCIÓN METANÓLISIS	$PET + 2CH_3OH \xrightarrow{ZnC_4H_6O_4} C_{10}H_{10}O_4 + C_2H_6O_2$
Metanol	65 USD/kg [138]
PET (recolección)	0,27 USD/kg [127]
Acetato de Zinc	78,2 USD/kg [139]
Dimetil tereftalato (DMT)	35 USD/kg [107]
Etilenglicol	50,82 USD/kg [126]
POTENCIAL ECONÓMICO	590,2 USD/kmol DMT

Nota. La tabla muestra el Potencial económico calculado para diferentes procesos de reciclaje del PET.

El potencial económico indica que el proceso de glicólisis es el más rentable en cuanto a productos-reactivos hace referencia, sin embargo, este podría verse alterado por factores sociales, económicos, políticos, cambio de divisas al igual que un cambio en los reactivos a emplear, cabe aclarar que es necesario un estudio financiero más profundo para determinar la viabilidad completa del proceso, en conjunto con la matriz de jerarquización realizada evidencia que el proceso de glicólisis es el más acertado para el proceso de reciclaje químico del PET coloreado.

4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE RECICLAJE GLICÓLISIS

Teniendo en cuenta los resultados del capítulo anterior, en este capítulo se estudiará y aplicará los fundamentos de ingeniería y diseño de procesos, con el fin de establecer las especificaciones técnicas del proceso de glicólisis para la gestión de los residuos de botellas PET para la ciudad de Bogotá, para este apartado se realizará un escalamiento a nivel planta piloto.

4.1 Metodología para el diseño conceptual del proceso

Descomposición Jerárquica de Douglas

Para el diseño del proceso de glicólisis se utilizó el método jerárquico heurístico de Douglas, este proyecto fue desarrollado conceptualmente mediante este método, realizando comparaciones con dos referentes bibliográficos. El primero “*Procédé De Glycolyse Du Poly(Téréphtalate D’Éthylène) En Deux Étapes Réactionnelles Domaine*” [140], el segundo: “*Chemical depolymerisation of PET complex waste: Hydrolysis vs. Glycolysis*” [104], *Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate*”, “*Process optimization for catalytic glycolysis of post-consumer PET wastes*”. Estos referentes se escogieron ya que brindan una información específica respecto a las condiciones operacionales del proceso y una explicación específica de cómo funciona este a una escala mayor; ya que diferentes artículos, tesis y libros recopilados y analizados mediante bibliometrías, obteniendo información genérica y algunos a escala laboratorio.

Partiendo de la metodología de Douglas, esta combina reglas heurísticas con una estrategia evolutiva para el diseño de procesos. Douglas, ha propuesto un procedimiento jerárquico heurístico para la síntesis de procesos, descrito en términos de una jerarquía de decisiones, donde cada nivel de decisión permite complementar el diagrama de flujo del proceso que se va elaborando progresivamente [141]. Este método propone cinco niveles, en su orden:

4.1.1 NIVEL 1: Discontinuo vs. Continuo

Se eligió como mejor alternativa un proceso semi-continuo, debido a que en la mayoría de los procesos por lotes estos se componen de una serie de pasos discontinuos y continuos, que funciona continuamente con arranques y paradas periódicas [142]-[143], para elegir este tipo de proceso se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Este tipo de proceso es utilizado para reacciones lentas como es el caso de la glicólisis del PET en la cual su tiempo de reacción es aproximadamente de 150 min, no se tuvo en cuenta la cristalización del monómero generado el cual se demora 180 min en cristalizar [144] -[143] debido a que este se simulo como una operación continua ya que no se contaba con la cinética de nucleación.
- En el caso de la materia prima disponible esta es limitada ya que la recolección del PET ámbar es difícil [143].
- Los procesos semi-continuos son escogidos para pequeñas o medianas cantidades de producción, en el caso de este proceso se ingresaran 5,4 ton/día de PET coloreado, no se tomaron el 100 % de los residuo PET ámbar los cuales son 14 ton/día, debido a que no es posible recolectar el total de este residuo, por lo tanto se tomó el mismo porcentaje de aprovechamiento de los residuos PET transparente el cual es el 39 % , se escoge procesos semi- continuos cuando el valor de capacidad no sobrepasa $10 \cdot 10^6$ lb/año-4500 ton/año [143].
- Se eligió un proceso tipo semicontinuo, ya que se enfocó en una delimitación a escala piloto. Para la glicólisis del PET se ha considerado, según varios artículos, los diferentes rangos de producción y capacidad de una industria de tamaño medio la cual se encuentra en una capacidad de 14 400 ton/año, capaz de producir entre 15 000 y 18 000 kg/lote [116]. Sin embargo, para un enfoque a escala piloto la capacidad de procesamiento no sobrepasa las 5 ton/día,

Tabla 13.

Capacidad Instalada de diferentes empresas de Glicólisis

EMPRESA	CAPACIDAD
Garbo Chem PET Technology	Planta piloto en operación de 3 ton/día
Jeplan Technology	Comenzó operación en 2019 con 1,11 ton/ día
Cure Technology	Planta piloto con una capacidad de 4,8 ton/día
Ióniqa technologies	Planta piloto operacional de 10 000 ton/año 27 ton/día

Nota. Muestra las empresas que realizan el proceso de glicólisis con su capacidad instalada. Tomado de: S. Hann and T. Connock, “Chemical Recycling : State of Play Report for CHEM Trust,” Chem Trust, Reino Unido 2020.[En línea]. Disponible en: <https://chemtrust.org/wp-content/uploads/Chemical-Recycling-Eunomia.pdf>. [Acceso: abril 8, 2021].

4.1.2 NIVEL 2: Estructura de entradas y salidas

En este nivel se consideran el número de corrientes de materias primas, productos, subproductos e inertes y su interrelación global. (la forma en que intervienen y el modo de recuperación o de eliminación) [141]. se deben responder las siguientes preguntas con el fin de cumplir con este nivel:

- La corriente de alimentación ¿Debería purificarse antes de que ingrese al proceso? [143].

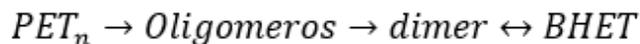
Si una impureza del alimento no es inerte y está presente en cantidades significativas, se debe retirar ya que de lo contrario dará lugar a pérdidas de material y se requerirá un sistema de separación más complicado para recuperar el producto de interés [143]. Para que el proceso de glicólisis sea efectivo donde el rendimiento y la purificación del BHET es alta es necesario ingresar las escamas de PET limpias. En el cumplimiento del proceso de recolección y pretratamiento de la materia prima PET coloreado, se indagó mediante directorios electrónicos, brindado por la empresa Acoplásticos [147], en los cuales, se investigó empresas residentes en la ciudad de Bogotá y que cumplieran con el proceso de recolección y pretratamiento del PET. La Asociación Cooperativa de Recicladores de Bogotá- (ARB ESP) tiene como servicios de aseo y recolección, donde contrata con entidades de diferente orden (estatal o privado), la prestación del Servicio de Aseo y Recolección de Basuras, proceso que involucra la recolección, transporte, tratamiento y comercialización de los Residuos Sólidos. [148].

- Un subproducto reversible ¿Debería removerse o hacerlo recircular? [143].

La reacción de glicólisis es una reacción reversible, donde los oligómeros formados son un producto intermedio de reacción, una parte se podrían reciclar de regreso al reactor ya que estos no afectan la velocidad de reacción, y para que estos alcancen el nivel de equilibrio en el que los oligómeros reciclados se descomponga para formar BHET, solo se recircula una parte ya que una alta cantidad de oligómeros en el reactor pueden generar una disminución en la conversión de equilibrio, esta corriente de recirculación fue comparada con la del referente guía [149].

Figura 18.

Reacción de Glicólisis de PET



Nota. Reaccion de la glycolysis del PET. Tomado de: R. López-Fonseca, I. Duque-Ingunza, B. de Rivas, L. Flores-Giraldo, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, "Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate," *Chem. Eng. J.*, vol. 168, no. 1, pp. 312–320, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.01.031. [Acceso: marzo 8, 2021].

- ¿Debería usarse un reciclo de gas con una corriente de purga? [143]

No hay reciclo de gas en el proceso de glicólisis ni purga de algún gas.

- Los reactantes sin convertir ¿Deberían recuperarse o hacerlos recircular?

El PET que no reaccionó se recircula al reactor ya que se desea obtener la mayor cantidad de BHET en el proceso, y el EG utilizado en el proceso se recircula al reactor primeramente para disminuir costos operativos, está demostrado que este EG reciclado genera el mismo rendimiento que EG fresco, y la segunda razón de reciclar este solvente es que contiene una porción de catalizador el cual sirve para posteriores reacciones [149].

- Corrientes efluentes ¿Cuántas debería haber? [143]

Se genera una sola corriente de efluente la cual es la purga de sólidos que contiene, aditivos, colorantes del PET, oligómeros y una pequeña fracción de la resina de interés sin reaccionar. Esta información es comparable con el referente guía [140].

4.1.3 NIVEL 3: Estructura de recirculados

El proceso de glicólisis emplea reactivos y sustancias de alto valor, por lo cual, con el fin de reducir costos y empleando las heurísticas respectivas, se desarrollaron dos corrientes de recirculación, la primera la corriente 10 la cual contiene PET, EG impurezas y trazas de catalizador, se consideró necesario esta recirculación con tal de evitar pérdidas de reactivos valiosos, sin embargo, se propuso una purga, que será explicada a continuación.

La segunda corriente de recirculación propuesta es la número 19, la cual tiene como objetivo recuperar la mayor cantidad de etilenglicol a la etapa de reacción, esta corriente contiene pequeñas trazas de agua y EG,

- **Purga**

El proceso de glicólisis contiene una purga según diferentes fuentes bibliográficas [140]-[104], ya que como se mencionaba anteriormente es necesario recircular una parte de la corriente de salida de la fase reactiva, sin embargo, no toda se recicla, una fracción es eliminada para controlar el ingreso de impurezas a la etapa de reacción. Inicialmente el PET contiene ciertas impurezas provenientes en la fabricación de la resina, al entrar en contacto el PET con el etilenglicol a las condiciones de reacción se produce BHET y productos intermedios como oligómeros, también PET no reaccionado, fragmentos de catalizador, así como los colorantes orgánicos e inorgánicos retirados de la resina tratante [140]. Por tal razón se ha decidido seguir dos heurísticas importantes [150].

- **Heurística 1:** Cuando se generen pequeñas cantidades de subproductos, en reacciones reversibles, no purgarlos ni separarlos, reciclarlos al reactor para que se agoten. [150].

- **Heurística 2:** Considerar el uso de purga para eliminar un inerte que entra en pequeñas cantidades [150].

Por tal razón, se considera una corriente de reciclo con composición de PET, EG, Impurezas, oligómeros y Catalizador donde se requiere una purga, que permite controlar el contenido de impurezas en dicha corriente sólida [140].

Para la purga se tomó como guía bibliográfica [149], ya que en dicha guía, se realizaron una serie de corridas de reacción introduciendo el residuo formado por oligómeros, dímeros y contaminantes junto con PET fresco, este procedimiento se repitió seis veces, donde pudo observar que el rendimiento en la primera reacción y la sexta reacción eran bastante similares, este comportamiento sugirió que la glucólisis simultánea de PET y oligómeros era factible [149]. Se observó que, al agregar más del 50 % del reciclo la velocidad de reacción era mayor, Sin embargo, la conversión de equilibrio máxima disminuyó (del 80 al 64 %) probablemente debido a una acumulación de impurezas presentes en el residuo alimentado [149]. Si se desea recircular residuos

de oligómeros una purga sería necesaria para evitar la acumulación de impurezas en el sistema global [140].

4.1.4 NIVEL 4 Especificación del sistema de Separación.

El método jerárquico heurístico de Douglas y las reglas heurísticas de separación son requeridas en procesos de glicólisis, ya que como en todo tipo de proceso químico es necesario aislar los productos purificados, recuperar subproductos valiosos, materiales indeseables o tóxicos [151]. En el caso del proceso, después de la fase reactiva en las corrientes se presentan impurezas de distinta índole que reducen la concentración del producto de interés (BHET) por tal razón se considera implementar distintos tipos de separación de acuerdo con los requerimientos y la fase o fases que se encuentren. Según esta metodología de Douglas dividimos este nivel en dos:

Subnivel 4A: sistema de recuperación de vapor: No aplica

Subnivel 4B: sistema de recuperación de líquidos

a) Recuperación de BHET disuelto y PET no reaccionado

El proceso reactivo de la glicólisis genera impurezas como oligómeros, PET no reaccionado, colorantes, trazas de catalizador y demás, en esta primera parte se ingresa agua para precipitar las partículas sólidas y así generar dos fases. Se determinó mediante reglas heurísticas y revisiones bibliográficas que es necesario purificar esta corriente para evitar acumulación de impurezas y recircular reactivos valiosos a la etapa de reacción [150]. La revisión bibliográfica propone equipos para la separación sólido- líquido tales como: separador de filtro o lecho, hidrociclón, una centrífuga, un decantador estático, un filtro prensa, o un filtro de cinta [140].

b) Purificación BHET sólido

El proceso de glicólisis requiere una etapa de purificación del BHET para tener un valor comercial alto, por tal razón se realizaron investigaciones y búsquedas bibliográficas, con el fin de determinar procesos de purificación de este producto. El referente bibliográfico [104] sugiere emplear una etapa de cristalización en procesos de purificación del BHET. La cristalización tiene un porcentaje de sólido recuperado de 98 % [152]. Por lo cual esta operación unitaria fue

seleccionada como proceso de purificación dado al costo de implementación y su rendimiento, al igual por el gran estudio que tiene, recomendaciones que presenta y aplicaciones en patentes propuestas [140]-[150].

c) Recuperación del Etilenglicol

El etilenglicol es un reactivo importante en el proceso de glicólisis, al ser un componente miscible en solventes polares, este se forma en una sola fase con el agua, razón por la cual es necesaria realizar un proceso de separación de este. Según las propiedades físicas y químicas de ambos componentes se seleccionó un equipo de destilación [140]. La búsqueda del sistema de destilación más económico, con integración calórica, capaz de separar una mezcla multicomponente de composición dada, implica definir [151]:

- La estrategia de separación
- La configuración del sistema de intercambio calórico.
- Las presiones de operación de las columnas.

Tabla 14.

Estrategia de separación y recuperación de Etilenglicol

Estrategia de separación	Directa, Por su gran diferencia en el punto de ebullición de los dos componentes.
Config. Sistema de intercambio calórico	Para separaciones directas se emplean Rehervidor total, condensador parcial
Presión de operación	La presión más recomendable es 1 atm [153]

Nota: Recuperación del etilenglicol. Tomado de N. J. Scenna and S. J. Benz, *Introducción al Diseño de Procesos Químicos. Breves Nociones*. 1999.

4.1.5 Nivel 5. Red de intercambio calórico

Se busca optimizar el número de intercambiadores de calor y de servicios (fuentes de “frío” y de “calor”) [141]. En el proceso de glicólisis se podría utilizar el agua evaporada de la torre de destilación como servicio para calentar el agua de la etapa de lavado.

Finalmente, una vez desarrollada la metodología de Douglas para el proceso de glicólisis del PET, se presentó la explicación del proceso comparando el desarrollo de la metodología desarrollada por los investigadores de este documento, con las guías bibliográficas citados al inicio de este capítulo.

4.2 Explicación técnica del proceso

El proceso emplea diferentes etapas descritas a continuación:

Inicialmente se realiza una etapa de reacción en un reactor de tanque agitado tipo Batch R-101, que comprende una alimentación inicial de PET previamente lavado con escamas de tamaño de 0,25 mm [140], Etilenglicol en una proporción molar de 1:7,6 PET/EG [144], se emplea una relación de catalizador (Na_2CO_3) de 100:1 PET/ Na_2CO_3 [144], y una fracción de reciclo, de un paso de separación posterior. El reactor opera a una temperatura de operación de 196 C°, presión de 0,1 Mpa (1 atm), tiempo de retención de 150 min y agitación de 600 rpm [140],[144]. Dicha corriente obtenida del reactor, es almacenada en tanques intermedios para luego ser ingresada a una etapa de purificación en donde se emplea un tanque de mezcla (M-201) y agua de proceso a 80 °C, la corriente es ingresada a este tanque de mezcla para precipitar los oligómeros de la mezcla [140], PET que no reaccionó, una fracción mínima de BHET (tereftalato de bis (2-hidroxietilo)), así como diversas impurezas compuestas por aditivos utilizados durante la fabricación del PET [104]-[140]. la corriente resultante es ingresada a una etapa de separación para separar la corriente en dos fases: sólido y líquido, por lo cual es ingresada a un filtro (F-301) que puede contener carbón activado, con el propósito de eliminar con mayor eficiencia las partículas de colorantes y pigmentos, la corriente líquida de esta etapa de separación comprende menos del 10 % de peso de partículas sólidas, y la corriente sólida comprende hasta un 90% de sólido resultante y un 10 % de líquido el cual contiene EG Y agua [104]-[140].

Una fracción de dicha corriente sólida es reciclada a la etapa de reacción para reciclar el PET que no se convirtió y oligómeros, la fracción no reciclada de la corriente sólida se elimina por medio de una purga, lo que permite controlar el contenido de impurezas en el reactor [140]. La fase líquida que contiene el BHET disuelto, agua y EG es enviada al cristizador (CR-401) donde entra en contacto con agua a 2 °C y una relación másica de 5:1 agua destilada – BHET [154], finalmente la corriente es separada en una centrifuga (C-501), donde se obtiene BHET sólido en forma de polvo y como efluente en la fase líquida se obtiene agua y EG el cual es ingresado a una torre de

destilación (D-601) con el objetivo de separar el EG del agua y poder ser reutilizado en la etapa de reacción [140]. En el **Anexo 3** se muestra el diagrama de Bloques y PFD con su respectiva información, este diseño fue elaboración propia a partir de: [104]- [140].

4.3 Criterios de diseño

4.3.1 Tipo de catalizador

Es necesario utilizar un catalizador para disminuir el tiempo de reacción ya que sin éste, la reacción demora aproximadamente 9 horas, en cambio con catalizador la reacción demora aproximadamente 2,5 horas y se obtendrá el mismo rendimiento que se obtendría sin catalizador donde la cantidad de energía necesaria disminuye [155].

El acetato de zinc es uno de los catalizadores que mayor rendimiento genera aproximadamente del 65 %, sin embargo los problemas que conlleva el catalizador de acetato metálico incluyen la toxicidad, no biodegradabilidad y no selectividad del producto final (monómero, dímero y cortador) [155]. Dado que el plomo y el zinc son metales pesados que se conoce tienen efectos negativos en el medio ambiente, actualmente se han desarrollado catalizadores más suaves que son comparativamente menos dañinos para el medio ambiente los cuales son álcalis suaves, carbonato de sodio y bicarbonato de sodio, donde se pudo determinar que los rendimientos de monómeros eran comparables a los de los catalizadores convencionales de zinc y acetato de plomo [108]. La actividad catalítica con estos catalizadores homogéneos es muy eficaz en la glicólisis del PET. Sin embargo, tienen varios inconvenientes, tales como que el catalizador no se puede separar fácilmente de la mezcla de reacción porque la mayoría de estos catalizadores son solubles en etilenglicol [108].

En diferentes estudios, se encontró que las sales de sodio podrían despolimerizar los desechos de PET casi tan eficientemente como lo hace el acetato de zinc donde se encontró que el carbonato de sodio generó un rendimiento de BHET del 63% con una relación molar de PET: catalizador de 380:1 es tan eficientemente como lo hace el acetato de zinc [149]. Por lo tanto, el impacto ambiental negativo relacionado con la toxicidad podría evitarse.

En cuanto al bicarbonato de sodio como catalizador, se encontró que en agua caliente disolvió el catalizador [144] de igual forma, se llegó a la conclusión que el único requerimiento para que

una sal sódica sea catalíticamente activa en este tipo de reacciones, es que tiene que ser soluble en EG caliente [144]; adicionalmente el documento citado anteriormente, evaluó diferentes sales metálicas como posibles catalizadores para la reacción de glicólisis; en donde se estimó que el sulfato de sodio es el compuesto que menos actividad catalítica tiene esto debido a su baja solubilidad con el EG. [144]. El bicarbonato de sodio y carbonato de sodio son catalizadores básicos que posee una alta solubilidad en etilenglicol que puede mejorar la capacidad de penetrar, difundir y tragar la estructura del PET [156]. También son baratos en comparación con los acetatos metálicos convencionales. Por lo tanto, se puede concluir que los álcalis suaves como el carbonato de sodio y el bicarbonato de sodio son eficaces para la producción de un buen rendimiento de BHET a partir de la despolimerización de PET [157], por tal motivo el bicarbonato de sodio se escogió como catalizador para este proceso.

El glicol que se utiliza en el proceso contiene una fracción importante del catalizador usado. La cantidad total de EG que se recupera puede tener una pureza 99,6% v / v lo que correspondió a una pérdida de alrededor del 10% con respecto al EG alimentado al reactor. Esta pérdida se atribuye a la EG consumido durante la reacción para dar BHET, el EG presente en las impurezas y el EG retenido con los productos de reacción [149].

El EG recuperado junto con EG fresco se utilizó en un estudio experimental para una reacción adicional, en el que el ciclo se repitió 11 veces, evidenciando que la conversión era prácticamente constante, alrededor del 80 %. Se observó que la velocidad de reacción fue negativamente afectados cuando se utilizó EG envejecido, el estudio demostró que el rendimiento alcanzado después de 1,5 h todas la reacciones con etilenglicol fresco y etilenglicol envejecido y con catalizador reciclado mostró el mismo valor de conversión de equilibrio, [149]. Asimismo, se encontró que el catalizador utilizado en la reacción estuvo presente principalmente en el filtrado de extracción y en la solución de EG después de la destilación, en esta última etapa se encontró la mayor cantidad de catalizador 73,8 % [149].

4.3.2 Cantidad de agua necesaria para la extracción y cristalización

El producto BHET se separó mediante dos pasos consecutivos, el primero es la extracción con agua caliente con el fin de precipitar el PET que no reacciono, los oligómeros y los colorantes y separarlos del producto de glicólisis (BHET) y el segundo paso, es un proceso de cristalización con

agua a 2 °C con el fin de separar el EG y el agua del monómero resultante (BHET) [149]. Con el fin de utilizar la menor cantidad de agua posible para la extracción y cristalización, se encontró en un artículo un estudio que determinaba la cantidad óptima de agua que se debe utilizar [149]. Para determinar la cantidad de agua fue necesario determinar el grado de saturación del BHET a 4 °C este grado de saturación se determinó experimentalmente para 66 ml de EG y 100-400 ml de H₂O, de las curvas de saturación para BHET en solución EG / H₂O obtenida experimentalmente, se observó que estaba entre los 6.9-9.8 g/L en un rango de temperatura entre los 0.5 °C -10°C, así se pudo determinar la cantidad de agua necesaria para diferentes rendimientos ya que sobrepasando la cantidad de agua necesaria causaron una mayor cantidad de monómero retenido en el filtrador [149]. En el **Anexo 4** se puede observar las cantidades de agua para diferentes rendimientos. para el caso de este proyecto y tomando como referencia bibliográfica el artículo de sciendirect que arroja los datos cinéticos, el rendimiento del BHET después de 1h para una relación molar de 100:1 PET/ Catalizador es del 76% [144] comparándolo con los rendimientos del artículo donde se tomó gráfica 13 el rendimiento después de 2 horas y para la relación molar de 100:1 PET/ Catalizador es del 82% [149], por lo tanto la cantidad de agua necesaria para el 82% de rendimiento de BHET es de 4,3 ml/g para la etapa de extracción y de 5 ml/g para la etapa de cristalización.

4.3.3 Efecto del tiempo y la temperatura

En cuanto al tiempo de glicólisis del PET es importante resaltar que el PET llega convertirse al 100 % después de 10 horas, sin embargo, el porcentaje en peso del BHET en los productos finales primero aumenta y luego disminuye, mientras que el dímero primero disminuye y luego alcanza un valor constante [155]. En consecuencia, el porcentaje en peso de los oligómeros primero disminuyó y luego se mejorará, por lo tanto, se puede concluir que, durante el proceso de despolimerización, el PET se despolimerizó primero en oligómeros; posteriormente, los oligómeros se convirtieron en dímero y luego en monómero BHET y con el aumento del tiempo el BHET se polimerizaría adicionalmente en dímero y luego en oligómeros [155]. Esto contará para la tendencia de la selectividad de BHET a mejorar primero y luego disminuir con un aumento del tiempo de reacción, este comportamiento se observa en el **Anexo 4**.

En cuanto a la temperatura, indica que la proporción de monómero BHET en los productos aumentará con el aumento de la temperatura de reacción, y luego los oligómeros disminuirán con el aumento de esta. Por lo tanto, la temperatura elevada es beneficiosa para la formación del BHET

[155], esto ocurre por el principio de Le Chatelier ya que al ser una reacción endotérmica al aumentar la temperatura se favorecerá a los productos, esto se observa en el **Anexo 4**.

4.3.4 Tamaño de partícula

Según diferentes estudios se observó que la disminución del tamaño de partícula condujo a una mejor descomposición del PET debido al aumento del área de superficie, por tanto, la partícula que tenía una dimensión de 0,25-0,35 mm es más adecuada y produce una mayor tasa de degradación [155] este resultado es comparado con el tamaño de partícula del artículo de la cinética de glicólisis siendo este también de 25 mm, en el **Anexo 4** se puede observar el rendimiento a diferentes tamaños de partícula.

4.4 Balance de materia y energía

De acuerdo con la explicación del proceso y la realización del diagrama PFD, se identificaron las corrientes y los equipos del diagrama de flujo del proceso propuesto, con el fin de realizar los balances de masa y energía de cada equipo para cada batch procesado, es decir en un intervalo de 2,5 horas de operación para el procesamiento de 1,09 toneladas de PET.

4.4.1 Balance de materia

Ecuación 5.

Ecuación general del balance

$$E - S + G = A$$

La ecuación (5) representa la forma general de realizar el balance de materia donde, E representa lo que Entra, S lo que Sale, G la tasa de generación y A la tasa de acumulación, los balances se realizaron con la ayuda del simulador ASPEN PLUS V9, las corrientes se expresan en cada equipo en términos de flujos ya que el programa ASPEN PLUS V9 trabaja con corrientes de flujo estacionarias.

Para realizar el balance de masa, es necesario conocer ciertos datos de importancia que serán ingresados al simulador con el fin de que genere el balance esperado por el usuario, esta información detalla se da a continuación:

- La cantidad de PET que se usara en el proceso es 5,4 ton/día, esta cantidad se determinó por el porcentaje de aprovechamiento del PET transparente y de las empresas que realizan el proceso de glicólisis a escala piloto.
- La cantidad de catalizador utilizado de carbonato de sodio con una relación molar PET: Na_2CO_3 de 100:1 [144].
- La cantidad de etilenglicol (EG) utilizado para la reacción con una relación molar PET:EG de 1:7,6 [144].
- La reacción tiene un rendimiento cercano al 80% de BHET puro a una temperatura de 197°C en 2,5 horas [144].
- La cantidad de pigmento utilizado para colorear la resina PET es del 0,5 % - 2 % del 100 % del PET [158]-[159].
- Relación másica de H₂O: BHET para la etapa de cristalización es 5:1 [154], esta relación es comparada con la gráfica de la figura (13), la cual se tiene una relación H₂O: BHE 5 ml/g [149], dando la misma cantidad de agua que se requiere. Relación másica de H₂O: BHET para la etapa de extracción es una relación 4,3 ml/g [149], según la gráfica de la figura (14).
- La conversión del PET es aproximadamente del 97 % [149]. Se tomo una recirculación de la purga del 50 %, ya que si se recircula más del 50 % de la purga genera una acumulación de impurezas en el reactor lo que causa una disminución en la conversión de equilibrio [149].

Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura (°C)	20	20	20	119	80	20	80	80	80
presión (atm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fracción vapor	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fracción solida	1	0	0,13	0,01	0,01	0	0	1,2*10 ⁻³	0,9
Fracción líquida	0	1	0,87	0,98	0,98	1	1	0,99	0,1
Flujo másico (kg/h)	446	362	1528	1528	1528	2980	2980	4508	18,21
Flujo Másico Por Componente kg/h									
PET	436	0	436	0,11	0,11	0	0	0,11	0,097
Etilenglicol	0	362	1038	897	897	0	0	897	0,33
Colorante	8,73	0	15,88	15,88	15,88	0	0	15,88	14,29
BHET (Líquido)	0	0	33,85	600	600	0	0	600	0,22
BHET (Sólido)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0	0	11,57	11,57	11,57	2980	2980	2991	1,10
Na2CO3	1,32	0	2,41	2,41	2,41	0	0	2,41	2,16
Flujo Molar Por Componente kmol/h									
PET	2,27	0	2,27	5,6*10 ⁻⁴	5,6*10 ⁻⁴	0	0	5,6*10 ⁻⁴	5*10 ⁻³
Etilenglicol	0	5,84	16,73	14,46	14,46	0	0	14,46	5,3*10 ⁻³
Colorante	0,11	0	0,19	0,19	0,19	0	0	0,19	0,17
BHET (Líquido)	1,2*10 ⁻²	0	0,12	2,26	2,26	0	0	2,26	8,6*10 ⁻⁴
BHET (Sólido)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0	0	0,64	0,64	0,64	165,42	165,42	0,64	0,061
Na2CO3	0	0	2,2*10 ⁻²	2,2*10 ⁻²	2,2*10 ⁻²	0	0	2,2*10 ⁻²	0,02
Corrientes	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Temperatura (°C)	76	76	80	20	2	2	2	2	100
presión (atm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fracción vapor	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fracción solida	0,9	0,9	1*10 ⁻⁴	0	0	0,12	0,84	0	0
Fracción líquida	0,1	0,1	0,99	1	1	0,87	0,15	1	1
Flujo másico (kg/h)	9,1	9,1	4490	100	100	4590	680	3909	3200
Flujo Másico Por Componente kg/h									
PET	0,05	0,05	0,01	0	0	0,01	0,010	0	0
Etilenglicol	0,16	0,16	897	0	0	897	22,84	874	199
Colorante	7,14	7,14	1,58	0	0	1,58	1,58	0	0
BHET (Líquido)	0,11	0,11	600	0	0	33,33	0,59	32,74	0
BHET (Sólido)	0	0	0	0	0	567	567	0	0
Agua	0,55	0,55	2990	100	100	3090	78,69	3012	3001
Na2CO3	1,08	1,08	0,25	0	0	0,24	0,24	0	0
Flujo Molar Por Componente kmol/h									
PET	2,5*10 ⁻⁴	2,5*10 ⁻⁴	5,5*10 ⁻⁵	0	0	5,5*10 ⁻⁵	5,5*10 ⁻⁵	0	0
Etilenglicol	2,6*10 ⁻³	2,6*10 ⁻³	14,45	0	0	14,45	0,368	14,08	1,41
Colorante	0,09	0,09	0,02	0	0	0,019	0,019	0	0
BHET (Líquido)	4,3*10 ⁻⁴	4,3*10 ⁻⁴	2,26	0	0	0,091	2,3*10 ⁻³	0,089	3,8*10 ⁻⁷
BHET (Sólido)	0	0	0	0	0	2,23	2,23	0	0
Agua	0,03	0,03	166	5,55	5,55	171,5	4,36	167,19	0
Na2CO3	0,01	0,01	0,002	0	0	0,002	0,002	0	0
Corrientes	19								

Temperatura (°C)	134	
presión (atm)	1	
Fracción vapor	0	
Fracción solida	0	
Fracción líquida	1	
Flujo másico (kg/h)	709,25	
Fujo másico por componente kg/h		
PET	0	
Etilenglicol	675	
Colorante	0	
BHET (Líquido)	32,74	
BHET (Sólido)	0	
Agua	11,02	
Na ₂ CO ₃	0	

Teniendo en cuenta el balance de materia mostrado anteriormente cuyos valores se obtuvieron de la simulación realizada en Aspen Plus V9, es necesario realizar una validación con datos experimentales para determinar si el programa arroja valores lejanos a los reales, para obtener dicha validación se calculó el porcentaje de error para tres datos importantes del proceso los cuales fueron tomados de dos artículos “*Process optimization for catalytic glycolysis of post-consumer PET wastes*, [149]” y “*Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate*” [144], el cálculo del error entre datos se muestran a continuación:

Ecuación 6.

Conversión del PET

$$\%Error = \frac{|99_{Aspen} - 97_{exp}|}{99_{Aspen}} \times 100 = 2\%$$

Ecuación 7.

Purificación del EG mezclado con el H₂O

$$\%Error = \frac{|90_{Aspen} - 99_{exp}|}{90_{Aspen}} \times 100 = 10\%$$

Ecuación 8.

Rendimiento del BHET

$$\%Error = \frac{|97_{Aspen} - 82_{exp}|}{97_{Aspen}} \times 100 = 15\%$$

4.4.2 Balance de energía

El principio que rige los balances de energía es la ley de conservación de la energía que establece que la energía no puede crearse ni destruirse, para el caso de balance de energía en sistemas cerrados se tiene en cuenta el estado inicial y final de un sistema [160], esta ley señala que la energía inicial (potencial, cinética e interna) del sistema menos la energía final del sistema a través de las corrientes, más la energía que se transfiere en forma de calor o trabajo, que se añade o desprende del sistema, es igual a la acumulación de energía en dicho sistema [160], donde la ecuación se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 9.

Balance de energía

$$Q + W = \Delta H + \Delta EP + \Delta EC$$

Para este caso se aplica el balance de energía para determinar el calor que requiere el reactor Batch para llevar a cabo la reacción de glicólisis durante el tiempo establecido de operación de 2,5 h, para ello se considera las siguientes especificaciones:

- La entalpía se tiene en cuenta debido a que hay cambios de temperatura, y se da una reacción la cual es la descomposición del PET al monómero BHET.
- Este sistema no tiene aceleración por lo tanto la energía cinética es $\Delta E = 0$, debido a que el sistema no se eleva ni cae entonces la energía potencial es $\Delta P = 0$.
- Debido a que el sistema y los alrededores no están a la misma temperatura y no está aislado el calor es diferente de cero, $Q \neq 0$.
- El trabajo realizado por el sistema es $W = 0$ no se transmite energía a través de las fronteras del sistema por alguna parte móvil

Ecuación 10.

Balance de energía

$$Q = \Delta H_{final} - \Delta H_{inicia}$$

Los resultados obtenidos del simulador fueron comparados con los resultados obtenidos de un diseño de planta para el proceso de pirólisis, dichos resultados y comparación se pueden observar a continuación:

Figura 19.

Resultados obtenidos del simulador aspen plus V9

Stop criterion number	<input type="text" value="1"/>	
Reaction time	<input type="text" value="2,5"/>	hr ▾
Heat load per cycle	<input type="text" value="3921,05"/>	MJ ▾
Average heat duty per cycle	<input type="text" value="1568,42"/>	MJ/hr ▾
Reactor minimum temperature	<input type="text" value="262,336"/>	K ▾
Reactor maximum temperature	<input type="text" value="468,19"/>	K ▾
Maximum volume deviation	<input type="text"/>	
Maximum volume deviation time	<input type="text"/>	▾

Nota. En esta figura se pueden observar los resultados obtenidos del balance de energía para este proceso

Tabla 15.

Resultados Obtenidos balance de energia

Q (MJ)	3921
Utilidad	Vapor de media
M (kg/h)	489
Q(MJ/kg producto)	2,5 MJ/BHET

Nota. Resultados Obtenidos en Aspen Plus

Tabla 16.

Resultados Bibliográficos balance de energía

Q (MJ)	10881
Utilidad	carbón mineral, Gas natural
M (kg/batch)	557, 28 m3/batch
Q(MJ/kg producto)	4,5 MJ/Carbón Y 2,08 MJ/fuel oil 4,5 MJ/gases no condensables

Nota. Resultados de comparación bibliográficos. Tomado de: D. Chivata and C. Duarte, “Diseño concetual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis,” tesis pre. Facultad de ingenierias, Fundacion Universidad De America, Bogota, Colombia 2018.

La cantidad de calor que debe ser ingresada al reactor para la reacción de glicólisis del PET, es mucho menor a la cantidad de calor que requiere el proceso de pirólisis de caucho ya que para la reacción de glicólisis, la mezcla del reactor se calienta de 20 °C a 195 °C, mientras que para el proceso de pirólisis se calienta de 20 °C a 600 °C, por este motivo el proceso de pirólisis requiere mayor carga energética para el proceso de este proyecto.

4.5 Dimensionamiento de equipos

Para el diseño de los equipos del proceso como lo son el reactor, el mezclador, el cristizador, los filtradores, los intercambiadores de calor y la torre de destilación, fue necesario utilizar el programa ASPEN PLUS V9. A continuación se muestra la metodología utilizada en el simulador y el dimensionamiento de cada equipo.

4.5.1 Metodología utilizada en Aspen Plus

Con el objetivo de diseñar los equipos principales, se inició el proceso de simulación, solicitando sesiones virtuales remotas el software ASPEN PLUS V9, en previa coordinación con la Dirección de Tecnología e Informática de la universidad, posteriormen se investigaron referentes y guías metodológicos que fueron citados a lo largo de este capítulo como: [152],[161], [162]. Iniciando el proceso de simulación, se creó una nuevo archivo en blanco, se seleccionó la plantilla “*Polymer with metric units*” siguiendo el referente [152]-[162], posteriormente en el módulo “*Properties*”

se eligió el filtro de método “*Polymer*” y como ecuación de estado “POLYSL” (Sánchez-Lacombe) siguiendo el referente metodológico [152], además teniendo en cuenta que Sánchez-Lacombe es una de las principales ecuaciones de estado poliméricas que se utiliza para predecir las propiedades termodinámicas de las soluciones poliméricas [163], Seguidamente se cargaron los componentes presentes en el proceso, para esto fue necesario agregar las bases de datos APV9 POLYMER, APV9 SEGMENT y APV9 PC-SAFT junto con las bases predeterminadas del programa, en el **Anexo 5** se encuentran las imágenes con el procedimiento explicado.

Una vez cargado los componentes, junto con sus propiedades fisicoquímicas brindadas por las bases de datos, se procedió al ambiente de simulación, donde se cargaron las corrientes de entrada con las composiciones especificadas y los equipos, con sus respectivas condiciones operación. Finalmente se realizaron múltiples corridas, rectificando posibles errores y/o advertencias, para así poder activar el módulo “*Aspen Economics*” según el referente bibliográfico *Aspentech*, “*Polymer process engineering*,” *Chem. Eng. Prog.*, vol. 84, no. 11, pp. 16–17, 1988., con el cual fue posible obtener el dimensionamiento de cada equipo principal.

4.5.2 Diseño del equipo reactor R-101

Se utilizó en Aspen Plus el Bloque RBatch para realizar el dimensionamiento del reactor, este bloque es un modelo de cinética rigurosa, el cual tiene como requisito conocer el modelo cinético de la reacción que está ocurriendo [164]. Al ser un reactor que trabaja en estado no estacionario, se debe especificar un límite de operación, en este caso se especifica como criterio de parada el tiempo de reacción sin embargo se pueden especificar varios criterios de parada [164], el bloque Rbatch utiliza tanques de almacenamiento intermedio y su tiempo de ciclo especificado para proporcionar un interfaz entre el estado dinámico del reactor por lotes y el estado estacionario de las corrientes continuas de Aspen Plus [165], Para calcular la cantidad de carga del lote, multiplica el flujo del diagrama por un tiempo de ciclo que ingrese, y el caudal de la corriente de producto del reactor es igual a la masa total en el reactor al final del ciclo dividida por el tiempo del ciclo del reactor [165].

Como se mencionó anteriormente, para el diseño del reactor se tuvo en cuenta la cinética de reacción la cual fue tomada de un artículo de la revista *Chemical Engineering Journal* llamado “Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate”. [144]. La cinética de la

reacción de glicólisis se llevó a cabo con una relación molar para todas las muestras de PET:EG de 1:7,6. y a varias condiciones de funcionamiento que cubren: Temperatura desde 165-196 °C, tamaño de partícula de 0,14 -3mm, velocidad de agitación de 50 a 800 rpm, concentración de catalizador, relación molar PET: catalizador (400: 1–100: 1) [144]. Se tomaron los datos de la tabla 18 como mejores condiciones de reacción obteniendo un rendimiento del 78% de BHET después del 1 h, donde se tuvo en cuenta la expresión cinética de la ecuación 8.

Tabla 17.

Condiciones de operación para el reactor

Temperatura	195°C
Relación molar PET: Na ₂ CO ₃	100:1
Tamaño de partícula	0,25mm
Velocidad de agitación	800rpm
Tiempo de reacción	2,5 h

Nota. Estos datos muestran las condiciones a las que debe operar el reactor

Ecuación 11.

Velocidad de despolimerización del PET

$$-\frac{dC_{PET}}{dt} = k'_1 C_{PET} - k'_2 C_{BHET} \quad \begin{array}{l} k'_1 = k_1 C_{EG} C_{CAT} \\ k'_2 = k_2 C_{CAT} \end{array}$$

Empleando la tabla estequiometria en términos de conversión se obtuvieron expresiones de concentración de las especies involucradas (PET y BHET), las expresiones en términos de conversión esto se puede observar en las ecuaciones del **Anexo 7**.

La glicólisis del PET es un sistema catalítico reversible homogéneo, es una reacción endotérmica ya que la relación de la constante de equilibrio con la ecuación de van't hoff dio una pendiente negativa lo que quiere decir la reacción se favorece a altas temperaturas esto se puede observar en las figuras del **Anexo 6** los datos utilizados para hallar la energía de activación se encuentran en las tablas del **Anexo 6**, la glicólisis del PET sigue la cinética de primer orden respecto a todas las especies involucradas, la explicación de la velocidad de despolimerización catalítica del PET se encuentra en el **Anexo 7** con la expresión cinética. Para hallar la energía de

activación (E_a) se utilizó la ecuación de Arrhenius y se realizó una regresión lineal con el fin de determinar la pendiente la cual es el valor de dicha (E_a) y el factor pre-exponencial dicha regresión se muestra en las figuras del **Anexo 6**, sin embargo, el artículo solo calculó la energía de activación para la reacción directa por tales motivos los investigadores de este trabajo calcularon la energía de activación inversa con los datos de las tablas del **Anexo 6**. Los parámetros cinéticos se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 18.

Parámetros cinéticos

Energía de activación E_{a1}	188 KJ/mol
Energía de activación E_{a2}	182 KJ/mol
Factor pre-exponencial 1	1,721 e22
Factor pre-exponencial 2	4,24 e21
To temperatura de referencia	165°C
Entalpía de reacción	12 KJ/mol

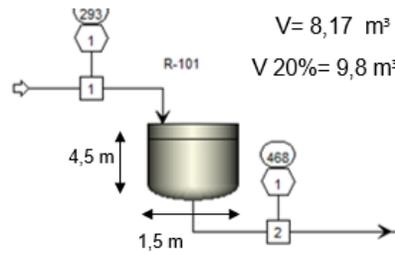
Nota. Estos datos muestran las condiciones a las que debe operar el reactor. Tomado de: R. López-Fonseca, I. Duque-Ingunza, B. de Rivas, L. Flores-Giraldo, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, “Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate,” *Chem. Eng. J.*, vol. 168, no. 1, pp. 312–320, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.01.031. [Acceso: marzo 8, 2021].

Con respecto al volumen, altura y diámetro del cuerpo del reactor, este se calculó en el módulo de APEA el cual dimensiona este reactor como tanque agitado teniendo en cuenta la presión para aplicar la relación (L/D), con base a la capacidad de procesamiento de PET residual, EG, Catalizador, colorante y Reciclos del proceso establecida por bachada que corresponde a 4 toneladas aproximadamente, en el **Anexo 8** se puede observar las condiciones ingresadas al programa del reactor y el dimensionamiento que arroja el programa.

Los datos del dimensionamiento que arroja aspen se pueden observar en el **Anexo 8**, el volumen del reactor fue de 8,17 m³, sin embargo, se diseña con un 20% de sobredimensionamiento según la norma API 650 para tanques a presión atmosférica [166]. Adicionalmente, la geometría del reactor es de forma cilíndrica con 4,5 m de altura y con un diámetro de 1,5 m.

Figura 20.

Dibujo del reactor de glicólisis del PET



Nota: la imagen muestra el reactor que se simuló en aspen plus V9.

Estas dimensiones fueron comparados con dos referentes bibliográficos, donde en uno de estos referentes fue el diseño de un proceso de pirólisis con un tiempo de reacción de 48 h, para una capacidad por batchada de 10 toneladas y obtuvieron como resultado un volumen de 28 m^3 una altura de 6 m y un diámetro de 2,44 m [167], comparándolo con los resultados del proyecto el volumen del reactor, el diámetro y la altura fueron menor a este referente esto se debe a que la cantidad de toneladas y el tiempo de residencia son menores para este proyecto. Como segundo referente bibliográfico se tomó el diseño de un proceso de glicólisis con una capacidad de 1,8 toneladas por batchada dándoles como resultado un volumen de 2 m^3 , 1,5 m de altura y 1,3 m de diámetro [105], el volumen, el diámetro y la altura del proyecto fue mayor ya que la cantidad a procesar es mayor en este proyecto, se pudo determinar que las dimensiones de los referentes tienen coherencia con los del proyecto.

Tabla 19.

Dimensiones del reactor

Método	Batch
Volumen	$8,17 \text{ m}^3$
Altura	4,5 m
Diámetro	1,5 m
Agitador	Ancla
Grosor chaqueta	8 mm
Material	CS
Utilidad	Vapor de media

Nota. Estos datos muestran las dimensiones del reactor del proyecto

Tabla 20.

Referentes bibliográficos dimensiones de reactor

Proceso	Pirólisis	Glicólisis
Método	BATCH	BATCH
Volumen	28 m ³	2 m ³
Altura	6 m	1.5 m
Diámetro	2,44 m	1,2 m

Nota. Estos datos muestran las dimensiones de dos referentes bibliográficos. Tomado de: D. Chivata and C. Duarte, “Diseño concetual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis,” tesis pre. Facultad de ingenierias, Fundacion Universidad De America, Bogota, Colombia 2018.

4.5.3 Diseño de los intercambiadores E-203, E-201 Y E-402

Los intercambiadores de calor que se utilizaron para este proyecto son de carcasa y tubos, ya que estos son uno de los diseños más utilizados en la industria, debido a que cuentan con una buena relación costo-eficiencia [168] y se pueden fabricar dentro de un rango amplio de tamaños que deben estar entre las dimensiones existentes comercialmente ya que los espesores de pared están predeterminados y dados por la industria, por esta razón se puede variar el diámetro el largo y la capacidad [168], también se eligió este tipo de intercambiador ya que se pueden elaborar en diferentes materiales (acero, cobre, cobre-níquel, latón, aluminio, aluminio-bronce, aceros inoxidables, etc) [168].

El dimensionamiento de los intercambiadores de calor para este proyecto se realizó en el programa de simulación ASPEN PLUS V9, para dicha simulación se empleó el bloque HEATX que permite realizar cálculos rigurosos de los diferentes parámetros necesarios para el diseño de un intercambiador para corrientes monofásicas y bifásicas basada en la lógica de Donald Kern [169], aspen realiza el diseño de los intercambiadores de calor mediante el modulo *Aspen Exchanger Design & Rating* (EDR) mediante dos métodos [169]:

- El método corto: donde se lleva a cabo con el mínimo número de datos, y no requiere especificar la geometría, este método calcula el calor agregado o removido y el cambio de temperaturas en ambos fluidos [170], toma valores constantes de caída de presión y de coeficiente global de transferencia de calor o puede estar especificado por el usuario [171].

- El método detallado: donde se puede determinar o especificar la geometría para estimar el coeficiente de película, el factor de corrección para la LMTD y las caídas de presión [170]. HeatX calcula la caída de presión utilizando la geometría de los deflectores, tubos y boquillas, y a partir de las propiedades de la corriente, este tipo de cálculo no está disponible en el cálculo corto [171], El coeficiente global de transferencia de calor se obtiene directamente del informe del simulador o utilizando la resistencia debido a la película del lado de la carcasa y de los tubos [172], y el cálculo de la LMTD se estima en función de la temperatura del fluido tanto por la carcasa como para el lado del tubo [172]

Del método detallado, se pueden obtener diferentes resultados según el modo de cálculo del simulador, entre dichos modos de cálculo esta [170]:

- Modo de design: los flujos están definidos termodinámicamente y hay condiciones que cumplir. El simulador se encarga de proponer y evaluar alternativas para algunas geometrías con el fin de encontrar el equipo óptimo que cumpla con los requisitos de energía [170]-[173].

- Modo de rating: aquí hay una geometría ampliamente conocida y flujos junto con una o más condiciones a cumplir. El simulador se encarga de evaluar si se cumple la condición y cuáles son los parámetros mínimos que deben cumplirse donde determina si el intercambiador de calor diseñado podrá transferir el calor requerido [170]-[171].

- El modo de simulación tiene flujos de entrada y una geometría claramente especificada. El simulador da resultados sobre el rendimiento del equipo. También se permite modificar ciertos parámetros, según se desee [170]-[171].

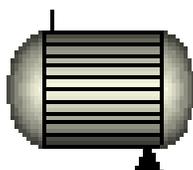
Existen varios métodos para clasificar la geometría de los intercambiadores de calor de carcasa y tubo, uno de ellos es según los estándares de TEMA en este método se rige Aspen Plus, los estándares TEMA están codificados por diferentes letras que especifican configuraciones de cuerpo

y cabeza disponible, [170]. Esto permite diferentes configuraciones que cubren la mayoría de los requisitos de las operaciones en la industria química[170]-[173]. Para el costo de los intercambiadores de calor el modulo APEA según el diseño estandarizado por la norma TEMA este módulo toma los datos de diseño y determina los costos proporcionados por diferentes empresas [174].

En cuanto al uso de los tres intercambiadores de calor, los cuales se utilizarán para diferentes propósitos, para el caso del primer intercambiador el cual corresponde al E-203 se utilizara para el enfriamiento de la mezcla reactiva a la salida del reactor de 195 °C a 80 °C con el fin de que esta mezcla se pueda mezclar con el agua y no provoque una evaporación de esta, el segundo intercambiador de calor es el E-201 este se utilizara para el calentamiento del agua que se mezclara con la corriente a la salida del reactor, y por último el tercer intercambiador es el E-402 este se utilizara para el enfriamiento del agua que ingresa al cristalizador. En cuanto a las especificaciones ingresadas de los intercambiadores en aspen y su dimensionamiento se encuentran en el **Anexo 9**. A continuación se puede observar las dimensiones de los tres intercambiadores.

Figura 21.

Dibujo de los intercambiadores HeatX



Nota. La imagen muestra los intercambiadores utilizados en Aspen Plus

Tabla 21.*Resultados de los intercambiadores simulados en aspen*

Intercambiadores de tubo y coraza	Intercambiador de enfriamiento de etilenglicol 1528 kg/h	Intercambiador de calentamiento agua 2980 kg/h	Intercambiador de enfriamiento agua 100 kg/h
Tin – Tout (°C)	195-80	20-80	20-2
Calor transferido Q (w)	159852	102333	1150
Utilidad (kg/h)	Agua fría	Vapor de media	Propano
Área de transferencia (m ²)	4,3	2,04	0,23
Longitud tubos (m)	1,65	1,2	1,2
Numero de tubos	48	32	30
Paso por los tubos	2	4	6
Diámetro de la coraza ID (m)	0,205	0,205	0,205
LMTD °C	111,13	121,75	44,21
Arreglo de tubos	Triangular	Triangular	Triangular
Tipo de arreglo	Contracorriente	Contracorriente	Contracorriente

Nota. se muestran la geometría de los intercambiadores de calor arrojada por el módulo EDR.

Tabla 22.*Resultados de los intercambiadores de referentes bibliográficos*

Intercambiadores de tubo y coraza	Intercambiador de enfriamiento de etilenglicol [175]- [176] 12600 kg/h	Intercambiador de calentamiento de agua [168] 398 kg/h	Intercambiador de enfriamiento de Agua [177] 46800 kg/h
Tin-Tout (°C)	80-40	16-60	89-80
Calor transferido Q (w)	358400	20593	5000000
Utilidad	Agua fría	Vapor saturado	Agua de mar
Área de transferencia (m ²)	63,97	0,11	0,75
Longitud tubos (m)	5	1,5	1,56
Numero de tubos	124	2	38
Paso por los tubos	2	4	2
Diámetro de la coraza ID (m)	0,39	0,19	0,21
LMTD °C	22,41	68,5	40,3
Arreglo de tubos	Cuadrado	Triangular	Triangular
Tipo de arreglo	Contracorriente	Contracorriente	Contracorriente

Nota: estos datos muestran la geometría de los intercambiadores de calor arrojada por el módulo EDR

Se realizó el mismo análisis de comparación para los tres intercambiadores del proyecto, donde se tuvo en cuenta la cantidad de flujo que se calienta o enfría, como se puede observar en la tabla (21) y la tabla (22) Para el enfriamiento de etilenglicol el cual es el intercambiador E-203 se requiere menor carga energética, área de transferencia de calor ya que el flujo de etilenglicol a enfriar es menor que el del referente, sin embargo el LMTD es mayor para el proyecto debido a que la diferencia de grados a la que se debe enfriar es mayor. Para el calentamiento del agua el cual es el intercambiador E-201 se requiere mayor carga energética, número de tubos, área de transferencia de calor y LMTD para este proyecto que el del referente debido a que se debe calentar un flujo de agua mayor, se requiere calentar a una temperatura mayor el agua y hay mayor transferencia de calor. Por último, para el enfriamiento del agua es cuál es el intercambiador E-402, el área de transferencia de calor, el calor transferido y el número de tubos es menor ya que se requiere menor cantidad de agua para enfriar que el del referente.

El arreglo de los tres intercambiadores de calor que Aspen tomo fue triangular, cambiar este arreglo era posible, sin embargo se mantuvo ya que este es más económico que al arreglo cuadrado y se utiliza para servicios limpios en este proyecto los servicios son agua vapor y propano lo cuales no ocasionan gran cantidad de ensuciamiento y se obtiene una mayor área de transferencia de calor, obteniendo unos resultados más eficientes y confiables [168]. Aspen ajusto los tres intercambiadores a un tipo de cabezal estacionario tipo B este se emplea para tubos en U, banco de tubos removible permitiendo el atornillado de los tubos y es el tipo de cabezal más económico [178], la segunda letra es el tipo de coraza aspen la ajusto a una coraza tipo E de un solo paso debido a que es el arreglo más común por ser económico y térmicamente eficiente [178], y la tercera letra el cual es el cabezal frontal de tipo M el cual es fijo [178]. En el **Anexo 9** se puede observar que estos modelos se ajustan a los requerimientos necesitados.

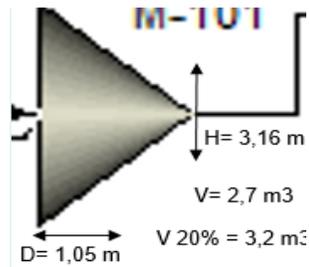
4.5.4 Diseño del mezclador M-201

En Aspen Plus se utiliza la unidad Mixer para combinar corrientes en una sola corriente, en esta unidad operativa se ingresan la temperatura estimada, la presión de salida, la fase en la que se encuentra la mezcla y el número de iteraciones para la convergencia de los parámetros, en el módulo de APEA los mezcladores se pueden ajustar a un modelo de tanque con agitación. Este mezclador se utilizará con el fin de mezclar el agua con la mezcla reactiva para así generar una precipitación del PET, Oligómeros y contaminantes como los colorantes, para el dimensionamiento

de este equipo aspen arrojó un volumen de la mezcla de 2,7 m³, realizando un sobredimensionamiento del 20% según norma API, el volumen es de 3,2 m³ con un diámetro de 1,05 m y una altura de 3,16 m, para una capacidad de 4500 kg/h, en el **Anexo 10** se observan las especificaciones del mezclador y sus dimensiones arrojadas por aspen plus. El tanque es de forma cilíndrica para evitar esquinas en las que no penetrarían las corrientes de fluido [179].

Figura 22.

Dibujo del Mezclador de glicólisis del PET



Nota: la imagen muestra el mezclador de la mezcla reactiva con H₂O que se simuló en Aspen Plus.

El tipo de agitador que aspen proporcionó como predeterminado cuando el usuario no lo especifica es el agitador tipo ancla el cual es un agitador de tipo radial [179], este tipo de agitador son utilizados para líquidos de media o alta viscosidad (20-50 pa*s) [179], aspen maneja este tipo de agitador predeterminado para todas las mezclas con el fin de proporcionar un agitador eficiente, por último la velocidad que reporta la literatura utilizada para este proceso es de 800 rpm [144], por lo cual es muy parecida a la velocidad del agitador en aspen, para las dimensiones del agitador se tomaron las relaciones presentes en el **Anexo 10**.

Tabla 23.

Dimensiones del mezclador M-201

Volumen tanque	2,7 m ³
Altura tanque	3,2 m
Diámetro tanque	1,051 m
Diámetro agitador	0,3 m
Distancia eje y fondo	0,3 m
Altura agitador	0,9 m

Nota. Estos datos muestran las dimensiones del Mezclador M-201 del proyecto

Tabla 24.

Dimensiones del mezclador del referente

Volumen tanque	4 m ³
Altura tanque	2, m
Diámetro tanque	1,5 m
Diámetro agitador	0,6 m
Distancia eje y fondo	0,6 m
Altura agitador	3934 kg/h

Nota. Datos de comparación bibliográfica para el mezclador. Tomado de: A. E. Padilla Alomoto, “*Diseño del proceso para la obtención de resina de poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET)*,” tesis pre. Facultad de ingenierías, *Esc. Politec. Nac*, Quito, Ecuador, 2014.

Para las dimensiones del tanque de mezclado, se realizó la comparación con un diseño de un proceso de glicólisis del PET, como se puede observar en la tabla (24) la capacidad de procesamiento del referente bibliográfico es ligeramente menor a la de este proyecto, sin embargo, el volumen del tanque del referente bibliográfico es mayor unas de las posibles causas es la proporción de la altura la cual es menor que la de este proyecto.

4.5.5 Diseño del Filtrador F-301

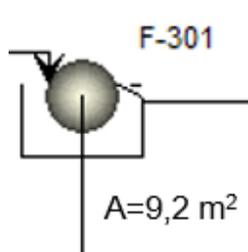
Este filtrador es utilizado para eliminar la mayor parte del PET que no reaccionó, oligómeros, colorante y catalizador del producto formado el cual es el tereftalato de bis (2-hidroxietilo) (BHET) que se encuentra disuelto en la mezcla de etilenglicol y agua, los filtros que se pueden simular en Aspen son filtros de vacío rotatorios (tipo tambor y disco) y filtros de banda. El modo de calculo que se puede utilizar en aspen plus es el modo diseño o simulación [172], el modo diseño se usa para dimensionar rigurosamente el filtro, para este tipo de modo de cálculo es necesario que el usuario ingresa ciertos datos como la caída de presión máxima permitida a través de la torta de filtración, la velocidad de revolución del filtro, la relación entre el ancho del filtro y el diámetro, espesor de la torta, etc [172], y para el modo simulación es necesario ingresar el tamaño del filtro el diámetro, el ancho del filtro giratorio , la velocidad de revolución etc [172].

Para este proyecto, se utilizó un modelo ideal de filtro ya que no fue posible utilizar un modelo riguroso debido a la falta de datos que pedía el simulador APEN PLUS, las especificaciones ingresadas y el dimensionamiento se muestran en el **ANEXO 11**, a la hora de realizar el dimensionamiento de este equipo en el módulo APEA, este filtro se ajustó a un filtro de discos este tipo de filtro se utilizó ya que es ampliamente aplicado en la industria, se emplea de forma continua, ofrece un área de filtración mayor en el mismo espacio que los tipo tambor [180], tienen gran capacidad para el espacio que ocupa y se utiliza cuando las partículas sólidas no son de gran tamaño [181], el módulo de APEA realiza el dimensionamiento de un filtro calculando la cantidad de producto de filtración basado en la información de flujo de salida [182], para este caso donde la operación es continua aspen toma un tiempo predeterminado de 0,08 h [182].

Los resultados que el programa arroja es un área de superficie de $9,2 \text{ m}^2$ según la literatura la cantidad de discos para una área de 9 m^2 es de 3 discos [183] aspen ajusto el filtro a 3 discos, para los filtros estándar de un caudal de $16 \text{ m}^3/\text{h}$ la velocidad de rotación es de 2,4 rpm y para caudales de $1032 \text{ m}^3/\text{h}$ son de 12 rpm [184], considerando el caudal de este proyecto el cual es de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ se toma una velocidad de rotación de 2,4 rpm, estos filtros tipo disco son altamente eficientes ya que pueden separar sólidos desde tamaños tan pequeños como 30 micras hasta 350 micras [184], a continuación se observan los datos obtenidos.

Figura 23.

Dibujo del Filtrador F-301



Nota. La imagen muestra el filtrador que separa el producto BHET.

Tabla 25.*Dimensiones del filtrador F-301*

Área de superficie	9,29 m ² – 83,61ft ²
Caudal	5,8 l/s – 20,7 m ³ /h
Caudal solido	18,38 kg/h
Numero de discos	3
Velocidad de rotación	2,4 rpm

Nota. Estos datos muestran las dimensiones del Filtrador F-301 del proyecto.

4.5.6 Diseño del Cristalizador CR-501

Aspen Plus V9 cuenta con el bloque “*Crystallizer*”, el cual desarrolla cálculos de balance de masa y energía para procesos de cristalización [185], este bloque asume como principales suposiciones: el producto (magma) sale del equipo en equilibrio y el liquido del producto (magma) esta saturado [186]. El bloque “*Crystallizer*” proporciona cuatro métodos para calcular la saturación: datos de solubilidad, función de solubilidad, química y el método riguroso subrutina de usuario.[186], el método seleccionado fue datos de solubilidad, ya que, los otros métodos requieren información de entrada respecto a la cinética de nucleación y de relación de crecimiento de cristal, esta información experimental no está disponible.

El equipo cristalizador fue simulado en el programa Aspen Plus V9 utilizando el bloque “*Crystallizer*”, este bloque requiere de información de entrada, como las condiciones de operación, se escogió el método de saturación de acuerdo con información de solubilidad del **Anexo 12**, también se especificó la reacción de cristalización y el solvente a emplear (agua), finalmente se introdujo la información de solubilidad del **Anexo 12**. estos datos fueron recuperados de los artículos [154] y [187]. La siguiente tabla recopila las condiciones de operación del cristalizador:

Tabla 26.*Condiciones de operación Cristalizador CR-501*

Temperatura	2°C
Presión	1 atm
Solvente	Agua a 2°C
Proporción de agua	5 ml/g BHET (100 kg/h)
Refrigerante	Propano R-290

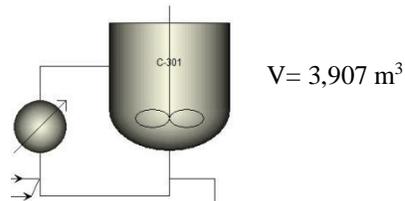
Nota: estos datos muestran las condiciones de operación del cristalizador. Tomados de: H. W. Goh, A. Salmiaton, N. Abdullah, and A. Idris, "Time, temperature and amount of distilled water effects on the purity and yield of Bis(2-hydroxyethyl) terephthalate purification system," *Bull. Chem. React. Eng. & Catal.*, vol. 10, no. 2, pp. 143–154, 2015, doi: 10.9767/bcrec.10.2.7195.143-154.

De acuerdo con la figura 14, precisada en el inciso 4.3.2 la cantidad de agua necesaria para la correcta cristalización del monómero BHET es una proporción de 5ml agua/g de BHET dando como resultado un aproximado de 3000 L de agua, sin embargo, realizando un análisis de sensibilidad en el equipo, fue posible determinar que un flujo de 100 kg/h de agua permite una cristalización de un 80% aproximadamente.

Empleando el módulo "*Aspen Economics*" fue posible dimensionar el equipo de acuerdo con la cantidad de material a procesar en este caso un promedio de 600 kg de BHET/h estos resultados son posibles de evidenciar en el **Anexo 12**, en la tabla (29) se muestra el resultado del dimensionamiento del equipo, el cual es validado y comparado con el referente metodológico de la empresa Mitex [188] que diseñó un cristalizador para procesar PET.

Figura 24.

Dibujo del Cristalizador CR-501



Nota. la imagen muestra el Cristalizador que genera el producto BHET en forma sólida.

Tabla 27.

Dimensionamiento y comparación del Cristalizador CR-501

Equipo	Capacidad	Proceso	Volumen (m ³)	Referencia
Cristalizador continuo	1488,83 kg/h	glicólisis PET	3,907	Autores investigación
Cristalizador continuo a vacío	750 kg/h	Cristalización PET	1,50	[188]

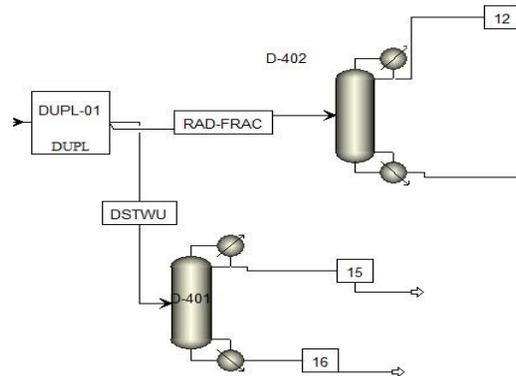
Nota. estos datos muestran las comparaciones entre el dimensionamiento obtenido del equipo con referentes bibliográficos.

4.5.7 Torre de destilación D-601

En el esquema del proceso, así como los diferentes referentes metodológicos estudiados sugieren emplear una torre de destilación con el fin de separar la mezcla Etilenglicol-Agua [140], [104]. Para la correcta simulación de este equipo, inicialmente se modeló el equipo empleando el bloque DSTWU el cual calcula las especificaciones de la torre mediante el método corto Winn-Underwood-Gilliland [189] en el bloque se ingresaron las especificaciones de entrada como se puede ver en el **Anexo 13**, este método calcula el número de etapas teóricas y la relación de reflujo mínima, si bien presenta cálculos aproximados, se decidió comprobar y ajustar la simulación de este equipo con el método riguroso Rad-frac, para esto, se empleó un bloque denominado “DUPL” para duplicar la corriente de alimentación.

Figura 25.

Diagrama de simulación torres de destilación D-601



Nota. Diagrama de simulación torres de destilación métodos DSTWU y RAD-FRAC usadas en aspen.

El método RAD-FRAC presenta una simulación rigurosa de equipos a partir de etapas de equilibrio [189] Esta unidad de destilación completa cálculos mucho más rigurosos que el método DSTWU, basando sus estimaciones en cálculos de etapa de equilibrio y se puede utilizar para simular absorción, separación, destilación extractiva y destilación azeotrópica para sólidos, líquidos y gases. Finalmente, la columna RadFrac puede tener múltiples corrientes de alimentación y productos (incluidas las corrientes de bombeo) y puede simular columnas con bandejas, empaquetamiento aleatorio o empaquetamiento estructurado [162]. A partir de los resultados de la simulación de la torre por método corto DSTWU del **Anexo 13**, se realizaron las especificaciones de entrada en el bloque de método riguroso RAD-FRAC esto con el objetivo de ajustar y rectificar el cálculo del método corto **Anexo 13**, con esta información fue posible simular correctamente la torre RAD-FRAC y obteniendo así las especificaciones de diseño de esta. La figura 54 en el anexo 12, muestra los resultados del modelo RAD-FRAC.

Tabla 28.*Especificaciones de diseño Bloque D-601 (RAD-FRAC)*

Especificaciones de diseño Bloque D-601 (RAD-FRAC)	
Tipo de calculo	Equilibrio
Numero de etapas	20 [153]
Condensador	Total
Re-hervidor	Kettle [190]
Método de convergencia	Strongly non-ideal liquid
Especificación de destilado	3200 kg/hr
Relación de reflujo (molar)	0,1208
Etapas de alimentación	19

Nota. La tabla muestra las especificaciones de entrada del equipo D-601. Tomado de: J. V. Rojas, L. Stinguel, M. R. Wolf-Maciél, and R. Guirardello, “Modeling and simulating complete extractive distillation process of ethanol-water mixture using equilibrium-stage distillation model and efficiency correlations (Barros & Wolf) on EMSO platform,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 50, pp. 331–336, 2016, doi: 10.3303/CET1650056. [Acceso: marzo 12, 2021].

Tabla 29.*Dimensionamiento obtenido torre de destilación RAD-FRAC*

Resultados Obtenidos	
Alimentación (m ³ /hr)	11,07
Alimentación (Kmol/hr)	181,36
Diámetro (m)	1,066
Altura (m)	18,44
N° de etapas	25
Etapas de alimentación	19
Relación molar de reflujo	0,1208
Tipo de bandeja	SIEVE
Eficiencia de bandeja	0,7

Nota. La tabla muestra el dimensionamiento de ambas torres Resultados obtenidos del módulo aspen economics en Aspen Plus V9.

En la rectificación de que los equipos fueran simulados correctamente, se realizó una gráfica de equilibrio liquido-vapor tipo T-xy en el módulo de Properties en Aspen Plus, que representa el comportamiento de la mezcla H₂O/Etilenglicol, evidenciando así la ausencia de azeótropos en la mezcla y presentando comportamiento similar a estudios experimentales del **Anexo 13**, adicionalmente estos resultados fueron comparados con dos referentes bibliográficos de sistemas de separación etanol-agua por destilación extractiva con etilenglicol [191],[192], la tabla 32 realiza una comparación de los resultados obtenidos con referentes bibliográficos.

Tabla 30.

Comparación dimensionamiento torre destilación con referentes bibliográficos

Resultados Obtenidos		Referente comparativo [191]	Referente comparativo [192]
Alimentación (kmol/hr)	181,36	113,2	44
N° de Etapas	25	16	11
Etapa de alimentación	19	11	6
Relación molar de reflujo	0,12	0,63	0,25

Nota. La tabla muestra la comparación entre el equipo D-601 con dos referentes bibliográficos

4.5.8 Diseño de la centrifuga C-501

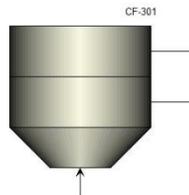
Aspen plus presenta dentro de la paleta de bloques diferentes equipos de separación, el bloque “CFUGE” funciona como simulador de filtros centrifugos para separar mezclas liquido- solido [162], este bloque de simulación opera asumiendo en la separación, una eficiencia de los sólidos igual a 1, por lo que la corriente de filtrado de salida no contiene residuos sólidos [162], “CFUGE” es empleado para dimensionar donde las especificaciones de entrada son el modelo de operación, la humedad residual y especificaciones de operación y calcula la tasa de flujo del filtrado, contenido de humedad de la torta, Altura de la canasta y diámetro de la canasta.

El equipo centrifuga (C-501) tiene como objetivo separar el producto solido cristalizado (BHET) proveniente del cristalizador, de la fase liquida rica en Agua y Etilenglicol, con el fin de lograr un correcto modelamiento de este equipo, se empleó el bloque de aspen Plus V9 denominado “CFUGE”. Inicialmente se ingresó información requerida en el bloque se puede observar en el

Anexo 14, optando así por el método “*decanter*”, ya que es el modelo más cercano para la separación de dos fases heterogéneas [162], en este bloque se especificó la fase seca y húmeda como se puede observar en el **Anexo 14**. El modelo empleado de clasificación por decantación empleado fue separación ideal, ya que no fue posible encontrar información experimental y de equipo que represente la separación de fases ocurridas en esta unidad operacional.

El equipo fue dimensionado con el módulo “*aspen economics*” El cual, para una cantidad de 4479,49 kg/h de material, el equipo requiere un diámetro de canasta de 1,152 m como se ve en el anexo 13, sin embargo, se agregó un sobredimensionamiento de seguridad correspondiente a un 20%. adicionalmente el módulo calcula la proporción de altura, superficie de la torta filtrante y superficie líquida con respecto al radio de la canasta, los resultados son presentados en la tabla 33.

Figura 26.
Dibujo de la centrifuga C-501



Nota. La imagen muestra la Centrifuga C-501 que separa el BHET de la fase líquida.

Tabla 31.
Dimensiones calculadas de la canasta equipo centrifuga C-501

Diámetro de la canasta	1,382 m
Radio de la canasta	0,691 m
Superficie líquida	0,509 m
Superficie de torta filtrante	0,545 m
Altura	0,659 m

Nota. Estos datos muestran las dimensiones de la canasta, estos datos fueron obtenidos de Aspen Plus.

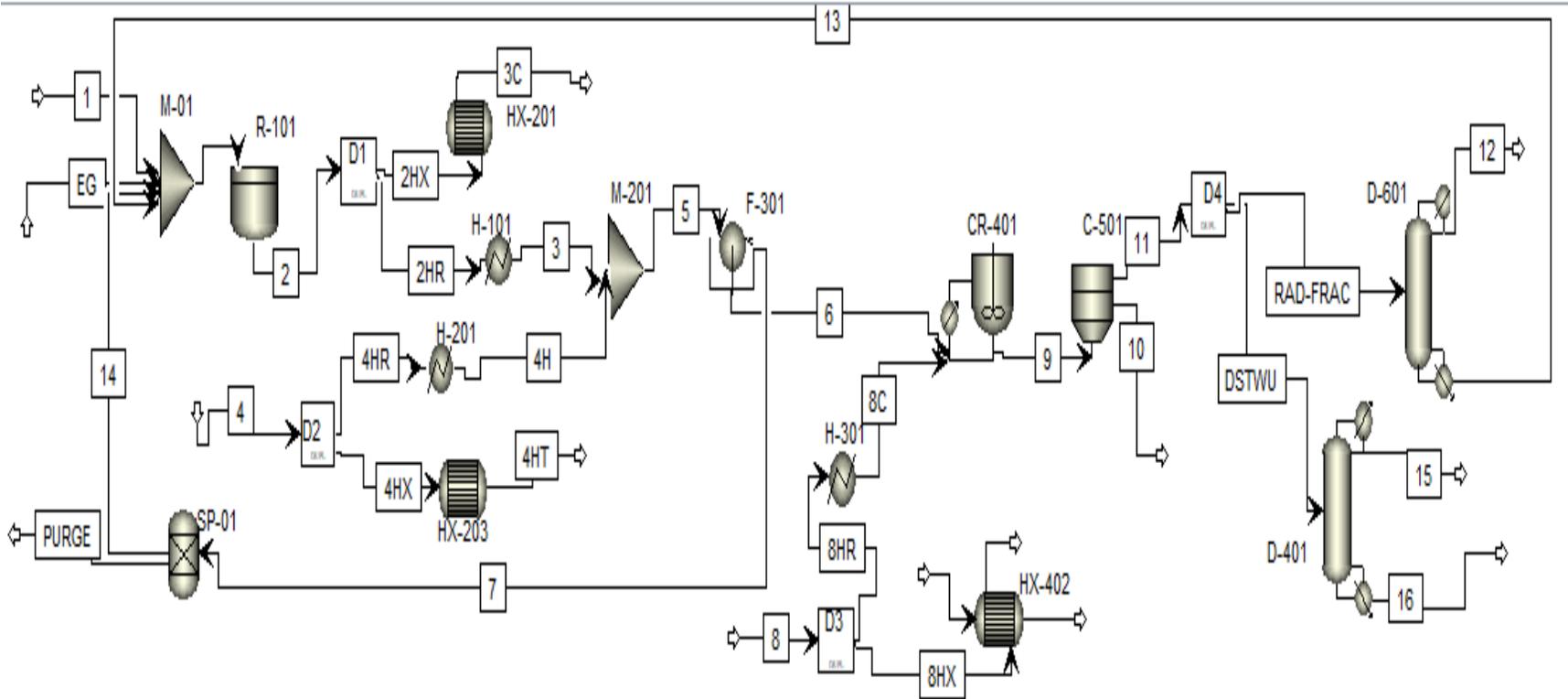
Tabla 32.*Comparación Dimensionamiento Centrifugas*

Equipo	Capacidad (m³/hr)	Proceso	Diámetro (m)	Altura (m)	Referencia
Centrifuga de canasta	12,3255	glicólisis PET	1,382	0,659	Autores de esta investigación
Centrifuga decantadora	30	Tratamiento de PET	0,76	1,271	[193]

Nota. Estos datos muestran las comparaciones entre el dimensionamiento obtenido del equipo con referentes bibliográficos. Tomado de: Hebei GN Solids Control.Co, “Plastic Recycling Decanter Centrifuge,” *solids control & waste management*, 2018. .

Las comparaciones realizadas de los equipos modelados con los referentes citados en el presente documento, fueron llevadas a cabo enfocándose en la similitud de compuestos a trabajar y en el tipo de equipo; se realizó una investigación exhaustiva con el objetivo de encontrar referentes con similitud en capacidad, sin embargo debido a la capacidad instalada seleccionada (5,46 ton/día) fue muy difícil encontrar dichos referentes, a pesar de esto, los referentes citados presentan una capacidad comparable con el volumen del equipo, es decir presentan comportamientos directamente proporcionales entre estas dos variables, comportamientos similares a los resultados obtenidos, evidenciando así una comparación válida respecto a las capacidades y volúmenes estudiadas en el presente capítulo. Cabe aclarar que en el desarrollo de este capítulo se realizó un dimensionamiento básico de cada equipo, se recomienda realizar estudios y simulaciones más profundas apoyadas con estudios experimentales para realizar un dimensionamiento más detallado. En este cuarto capítulo, se realizó el diseño del proceso mediante la metodología jerárquica de Douglas, donde se aplicó cada uno de sus niveles al proceso de glicólisis del PET, y determinó las separaciones que se realizaban en el proceso, las corrientes de purga, las corrientes de reciclaje, después de determinar dichas condiciones se realizó el diagrama PFD y de bloques con el fin de poder realizar el dimensionamiento de los equipos en programa ASPEN PLUS.

4.5.9 Esquema del proceso de glicólisis del PET en ASPEN PLUS



5. ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROCESO DE GLICÓLISIS DEL PET

Teniendo en cuenta las especificaciones del dimensionamiento de los equipos realizadas en el capítulo anterior, en este capítulo se realiza una estimación de costos de los equipos y las utilidades de servicio que se necesitan para el proceso de glicólisis para el reciclaje del PET, para determinar dichos costos se utilizó el programa ASPEN PLUS V9, estos costos que arroja el programa fueron comparados con páginas de empresas que se dedican a la venta de diferentes equipos industriales y con artículos.

5.1 Funcionamiento del módulo APEA

Para que el simulador Aspen Plus genere la estimación de los costos en el módulo APEA (Aspen Process Economic Analyzer), el cual es un sistema de software para la evaluación económica de diseños de procesos se determina el gasto de capital, los costos operativos y la rentabilidad de los diseños propuestos. APEA se utiliza para: generar estimaciones de tamaño y costo para el equipo de procesamiento, en este módulo se puede estimar los costos de compra e instalación, los costos de mano de obra, de servicios y la inversión de capital total [194]. Aspen APEA usa los datos de diseño y los costos proporcionados por empresas como capitan overlay Technologies, fisher control international, Jhon Zinck company, etc [194].

El módulo de costeo evalúa la economía basada en la tecnología Icarus [195]. El enfoque utilizado en la tecnología no se basa en las curvas factorizadas por capacidad para el tamaño del equipo, ni tampoco en factores para estimar las cantidades de instalación y el costo instalado a partir del costo del equipo básico. En cambio, sigue los códigos y procedimientos de diseño estándar de las industrias nombradas anteriormente para representar equipos con volúmenes de planta asociados, y métodos de programación y/o modelado de costos para estimar el costo del proyecto[195]. Los principales pasos de la evaluación económica integrada son los siguientes:

- Activar el motor de cálculo de costes
- Asignación de operaciones unitarias a equipos
- Dimensionamiento de Equipos
- Evaluación económica y revisión de resultados

Los pasos de mapeo y dimensionamiento, se pueden realizar individualmente o se pueden omitir en favor de una "evaluación automática" basada en mapeos asignados por defecto y algoritmos de dimensionamiento[195]. En este caso que compete el mapeo fue realizado individualmente de cada equipo, logrando así un dimensionamiento y evaluación económica más precisa.

El costo de la utilidad de un proyecto lo determina el módulo económico en función de la utilidad de proceso, los fluidos pueden ser seleccionados adecuadamente por el usuario o por el experto en dimensionamiento de la lista de 21 flujos de servicios públicos predeterminados ya presente en el simulador[195]. Una vez que se seleccionan las utilidades a emplear en el proyecto, el módulo determina los flujos y costos durante la evaluación de costos operativos[195].

Los resultados de la evaluación económica y los resúmenes de equipos se pueden crear en formato Excel como Informe económico completo del proyecto. El resumen y los resultados detallados se pueden revisar para estudiar la viabilidad del diseño y comparar alternativas de proceso[195].

5.1 Estimación de los costos de los equipos

Como se mencionó con anterioridad, la estimación de costos se realizó en el módulo de APEA, dichos costos se plasmaron en la tabla 35, junto con los referentes bibliográficos, los cuales se trataron de comparar con el tamaño de los equipos del proceso, en el **Anexo 15** se pueden observar los costos arrojados por el programa.

Estos costos fueron calculados basados en la simulación desarrollada en el software Aspen Plus V9, este programa fue desarrollado en el año 2016, por tal razón sus bases de datos se encuentran desactualizadas, para obtener los precios actuales de los equipos, se realizó un cambio del ajuste del material de cada equipo, se ejecutó una conversión de precios de los equipos teniendo en cuenta los periodos partiendo del año 2015 hasta la actualidad. Se investigó en diferentes análisis de mercado de los dos materiales (acero al carbón y acero inoxidable 304) el historial de precio [205]-[206], finalmente se efectuó dos graficas que describen el comportamiento de los costos en los periodos establecidos. Estas figuras pueden ser vistas en el **Anexo 16**.

Tabla 33.*Costos de Equipos empleando Aspen (APEA)*

EQUIPO	Costo equipo (USD) (APEA)	Costo actualizado (USD)	Costo referente comparativo (USD)	Utilidad
Reactor R-101	\$ 79 800	\$ 105 963	\$102 000 [196]	Vapor de media
Cristalizador CR-401	\$ 164 300	\$ 340 079	\$ 200 000 [197]	Propano R290
Columna D-601	\$ 193 300	\$ 400 105	\$ 116 704[198]	Propano R290 (condensador)
Centrifuga C-501	\$ 128 400	\$ 170 498	\$ 161 100 [199]	Electricidad
IC E-201	\$ 9800	\$ 13 014	\$ 61500 [200] -\$428-\$ 80000 [201]	Agua fría
IC E-203	\$ 8700	\$ 11 552	\$ 61500 [200] -\$428-\$ 80000 [201]	Vapor de media
IC E-402	\$ 9500	\$ 12 615	\$ 61500 [6] -\$428-\$ 80000 [5]	Propano
Filtro F-301	\$ 48 300	\$ 99 975	\$ 25000- \$ 58000 [202]-[203]	Electricidad
Mezclador M-201	\$ 47 200	\$ 62 676	\$ 50000 [204]	Electricidad
TOTAL		\$ 1 216 477 USD - 4 536 242 733 COP	\$ 610 000 USD-2 264 856 800 COP [178]	

Nota. La tabla recopila los costos de los equipos proporcionados por el módulo APEA con sus referentes.

5.2 Estimación de los costos de las utilidades

A continuación, se observan los precios de las utilidades para el proceso para el año de producción trabajando 12 horas diarias a la semana, estos costos arrojados por Aspen plus también se pueden observar en el **Anexo 15**. En este caso no fue necesario realizar una corrección de costos ya que el módulo de Aspen Plus permite el ingreso de los costos de las utilidades propuestas.

Tabla 34.

Costos de utilidades empleando Aspen (APEA)

Utilidad	Flujo	Flujo	Costo/hora	Costo anual
Electricidad	103,723 KW	103,723 KW	\$ 7,32	\$ 31622 USD
Agua de enfriamiento	7065 kg/h	147451 KJ/H	\$ 0,122	\$ 527 USD
Vapor de media	879,3 kg/h	368292 KJ/H	\$ 0,81	\$ 3499USD
Propano R290	1036 kg/h	60084 KJ/H	\$ 0,1640	\$ 708 USD
TOTAL				36 356 USD/año - 136 368 993 COP/año

Nota: la tabla resume el costo de utilidades necesarias para el proceso y su costo con el módulo APEA

En este capítulo se determinaron los precios básicos para la implementación de un proceso de glicólisis del PET por medio del programa Aspen Plus V9 con ayuda del módulo de APEA los cuales fueron comparados con diferentes referentes bibliográficos.

6. CONCLUSIONES

En este documento se recopiló un estudio característico de los residuos sólidos de la ciudad de Bogotá, definiendo valores cuantitativos respecto a la cantidad de desechos generados con potencial reciclable de la resina PET de color. Lo expuesto anteriormente, permite concluir que, de acuerdo con recientes estudios citados, se generan alrededor de 985,67 ton/día de residuos plásticos en la ciudad, de esta cantidad, corresponden 1,47 ton/día de botellas PET con residuos de aceite, que constituye el 0,15 %, 5,22 ton/día de botellas PET ámbar y de color que constituye el 0,53 %, 3,44 ton/día de Botellas PET de color verde, que constituye el 0,35 %, 1,57 ton/día PET ámbar y de color, constituye el 0,16 % y 2,36 ton/día de PET verde que constituye el 0,24 %. De forma general se obtiene un total de 14,06 ton/día de estos residuos con potencial reciclable, de dicha cantidad se utilizó un porcentaje que se determinó según la alternativa de reciclaje seleccionada a escala piloto, estos residuos de PET coloreado contienen entre 0,5 % y 2% de pigmentos orgánicos (quinacridona y las ftalocianinas), pigmentos inorgánicos (dióxido de titanio, azul ultramar, óxido de hierro y óxido de cromo) y colorantes monoazo por dicha razón no es posible reciclar esta resina mecánicamente ya que genera impurezas en la resina transparente reciclada. Por último el aumento en la demanda y oferta del plástico PET en Bogotá, ha generado un incremento en los desechos pos consumo de estos, sin embargo, para el caso del PET ámbar y de color el porcentaje de caracterización de estos, ha disminuido ligeramente debido a las regulaciones respecto al manejo de residuos sólidos de las empresas han sido más estrictas y la innovación en etiquetas termo encogibles como reemplazo a las botellas coloreadas, las cuales son una alternativa diferente y novedosa.

En cuanto a la alternativa seleccionada se realizó un estudio bibliométrico por medio del programa bibliometrix para así determinar las alternativas y los criterios. Empleando el método de jerarquización analítica y teniendo en cuenta los criterios (consumo de energía, valor del producto generado, pasos del procesos, aplicabilidad industrial y contaminación), la alternativa con mayor peso en términos de porcentaje fue la glicólisis con un 25 %, seguido la gasificación con un 21 % y en tercer lugar la metanolisis con un 16 %, la glicólisis fue determinada como mejor alternativa debido a que este proceso genera baja contaminación, el monómero formado se puede utilizar para generar espumas de poliuretano, poliéster o nuevamente la resina PET lo cual brinda la posibilidad de cerrar ciclos de producción aprovechando los residuos y realizar una posible transición a la ya

conocida economía circular, en cuanto a la energía consumida, la pirólisis y gasificación requieren alto consumo energético, mientras que el consumo para la glicólisis se encuentra en un valor intermedio con respecto a la metanólisis e hidrólisis que requieren un consumo similar, sin embargo estas dos últimas alternativas requieren de altas presión y proceso de separación complejos.

Se realizó el diseño del proceso seleccionado por medio de la metodología jerárquica heurística de Douglas, donde se aplicó los cinco niveles de dicha metodología, para así determinar que el proceso operara de forma semicontinua con una capacidad de procesamiento de 5,041 ton/día (1814 ton/año), dicha cantidad equivale a un 39% del total de residuos PET ámbar, se escogió este porcentaje ya que para el proceso de glicólisis a escala piloto este no sobrepasa las 10 000 ton/año, seguido de esto se determinó las corrientes de separación de líquidos y sólidos, de purga y las corrientes de reciclaje. De acuerdo a la modelación realizada en Aspen Plus se obtuvo una cantidad del monómero BHET de 6,9 ton/día (2484 ton/año) y una cantidad de residuos de colorantes, oligómeros y catalizador de 0,1092 ton/día (39,3 ton/año), con el diseño del procesos se realizó el dimensionamiento de los equipos con ayuda del programa Aspen Plus V9, para la implementación del proceso en este programa se utilizó ciertas especificaciones como el modelo termodinámico POLYSL, los compuestos que intervienen en el proceso y los equipos utilizados en el proceso con sus respectivas condiciones de operación, los equipos que se utilizaron en el simulador son el Rbatch, Filter, Mixer, Centrifuge, HeatX, DSTWU Y Radfrac, los cuales se dimensionaron por medio del módulo APEA el cual genera un tamaño básico de los equipos, los resultados obtenidos se compararon con referentes bibliográficos que utilizaran las mismas sustancias.

El proceso de reciclaje químico para los envases ámbar y de color PET diseñado, planteado, estudiado y modelado en este documento requiere una inversión inicial referente a costos de equipos de \$ 1 216 477 USD y costos variables de utilidades requeridas de \$36 356 USD/año, equivalente a \$ 4 536 242 733 COP y \$ 136 368 993 COP respectivamente (tasa de cambio 1 USD= 3 729 COP). Estos costos fueron calculados empleando el módulo *Aspen Process Economic Analyzer*, disponible en el software de simulación Aspen Plus V9. El valor de estos costos preliminares puede considerarse una variable de acuerdo a factores como: valor en el cambio de divisas, cambios en el mercado nacional e internacional de polímeros y monómeros, problemáticas de carácter ambiental, social, político, tecnológico y de salud del país.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Revista semana, “*Colombia solo recicla 17% de sus residuos y la meta es 40% a 2030,*” *Revista semana*, p. 1, 2020. . [Online]. Disponible en: <https://www.semana.com/empresas/articulo/meta-de-reciclaje-de-colombia-a-2040-sera-del-40-del-total-de-desechos/301643/> [Acceso: Marzo 26, 2020].
- [2] C. Suarez Bedoya, “*Bogotá produce 6.300 toneladas de basura al día,*” *Concejo de Bogotá*, 2018. [Online]. Disponible en: <https://concejodebogota.gov.co/bogota-produce-6-300-toneladas-de-basura-al-dia/cbogota/2018-09-03/134429.php> [Acceso: Marzo 26, 2020].
- [3] Sostenibilidad Semana, “*En colombia, por cada 10 botellas plásticas que salen al mercado solo se reciclan 3,*” *Ecologista sostenibilidad ambiental*, 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.ecologista.com.co/en-colombia-por-cada-10-botellas-plasticas-que-salen-al-mercado-solo-se-reciclan-3/> . [Acceso: Marzo 26, 2020].
- [4] L. Florez, “*¿Podría el reciclaje químico ser la solución?,*” *Tecnología del plástico*, 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.plastico.com/blogs/Podria-el-reciclaje-quimico-ser-la-solucion+130142> . [Acceso: Marzo 26, 2020].
- [5] K. Ragaert, L. Delva, and K. Van Geem, “*Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste,*” *Waste Manag.*, vol. 69, pp. 24–58, 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044. [Acceso: Marzo 26, 2020].
- [6] P. Adams, “*The coloration of Plastics and rubber,*” *Cariant Plast. Coatings USA Inc*, 2019. [Online] Disponible en: <https://www.clariant.com>[Acceso: Marzo 26, 2020].
- [7] D. Marcano (2018)., *Introducción a la Química de los Colorantes*. [Online]. Disponible en: <http://saber.ucv.ve/handle/123456789/974> [Acceso: Marzo 26, 2020].
- [8] F. Kramer, “*¿Por qué la botella transparente es más amigable con el medio ambiente que la de color?,*” *Coca Cola Journey Chile*, 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.cocacoladechile.cl/historias/medio-ambiente-por-que-la-botella-transparente-es-mas-amigable-con-el-medio-am> . [Acceso: Marzo 26, 2020].
- [9] Bavaria, “*Aplicaciones y aprovechamiento de pet ambar reciclado,*” *Bavaria*, 2014. [Online].Disponible en: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/static.tuproyecto.com/documents/convocatorias/Reto-Bavaria-PET-ambar.pdf> . [Acceso: Marzo 26, 2020].

- [10] D. Cueto, “*Reto Bavaria busca emprendedores con soluciones para problemáticas ambientales,*” *Universidad del Norte*, 2015. [Online]. Disponible <https://www.uninorte.edu.co/web/grupoprensa/noticia?articleId=9165017&groupId=73923> [Acceso: Marzo 26, 2020].
- [11] Bavaria, “*Bavaria dona 30,000 máscaras hechas con material reciclado de Pony Malta y Agua Zalva,*” *Bavaria*, 2020. [Online]. Disponible: <https://www.bavaria.co/mascaras-ambiente-bavaria>. [Acceso: Marzo 26, 2020].
- [12] S. Ramos, “*Bavaria, una empresa comprometida con el ambiente: propuesta para disminuir el impacto ambiental del uso de botellas plástico PET,*” *Univ. EAFIT*, pp. 18–22, 2019. [Online] Disponible: <http://hdl.handle.net/10784/15975> [Acceso: Abril 12, 2020].
- [13] M. Minneboo, “*Desafíos para el reciclaje en Colombia,*” *Plastic Oceans*, 2019. [Online] Disponible: <https://plasticoceans.org/desafios-para-el-reciclaje-en-colombia/> [Acceso: Abril 12, 2020]. .
- [14] M. C. Ortiz Cortes and J. E. Díaz Rosero, “Evaluación de un proceso no convencional de reciclaje de PET ámbar para la obtención de placas decorativas,” *Inf. Técnico*, vol. 82, no. 1, p. 41, 2018, doi: 10.23850/22565035.937.
- [15] M. N. Ortega, S. M. Castro, and C. Serrano, “*Reciclaje PET de tendencia a negocio,*” *Tecnol. del plástico*, vol. 26, no. 0120–7644, p. 72, 2012. [Online] Disponible: <http://www.plastico.com> [Acceso: Abril 12, 2020]. .
- [16] C. Sanchez Herrera, J. Peña Ruiz, and L. Rico Leguizamón, “*Identificación de los usos actuales del tereftalato de polietileno (PET) Reciclado en la Ingeniería Civil,*” *Univ. Coop. Colomb.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2018. [Online] Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.12494/4232> [Acceso: Abril 12, 2020]
- [17] M. Cruz, “*La empresa que transforma el plástico en edificios,*” *El Tiempo*, 2018. [Online] Disponible: <https://www.eltiempo.com/bogota/miniwiz-una-empresa-que-transforma-plasticos-en-ladrillos28> [Acceso: Abril 12, 2020]
- [18] A. H. Tullo, “*Plastic has a problem; is chemical recycling the solution?,*” *Chemical & Engineering News*, 2019. [Online] Disponible: <https://cen.acs.org/environment/recycling/Plastic-problem-chemical-recycling-solution/97/i39> [Acceso: Abril 12, 2020]. .

- [19] S. Yamada, M. Shimizu, and F. Miyoshi, “*Thermoselect waste gasification and reforming process,*” *JFE Tech. Rep.*, vol. 3, no. 3, pp. 21–26, 2004. [Online] Disponible: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/003/pdf/003-05.pdf> [Acceso: Abril 12, 2020]
- [20] A. Emelyn, “*Aplicaciones Del Etilenglicol,*” *Club Ensayos*, 2013. [Online] Disponible:<https://www.clubensayos.com/Ciencia/Aplicaciones-Del-Etilenglicol/1245521.html> [Acceso: Abril 12, 2020] .
- [21] D. Ardila and A. Salazar, “*Diseño de un plan de negocio para la creación de una empresa recicladora y comercializadora de plástico pet molido y lavado en la ciudad de neiva como opcion de grado para optar el titulo de magister en gerencia de la cadena de abastecimiento,*” *Univ. EAN*, vol. 1, no. 3, p. 99, 2016, [Online]. Available: https://www.m-culture.go.th/mculture_th/download/king9/Glossary_about_HM_King_Bhumibol_Adulyadej's_Funeral.pdf. [Acceso: Abril 12, 2020] .
- [22] A. Guapisaca and F. Pintado, “*Valoración de métodos químicos para obtener ácido tereftálico a partir del tereftáto de polietileno PET,*” *Univ. Politec. Sales.*, 2019. [Online]. Available:<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17631/1/UPS-CT008380.pdf> [Acceso: Abril 12, 2020] .
- [23] F. Akbarzadeh, M. Motaghi, N. P. S. Chauhan, and G. Sargazi, “*A novel synthesis of new antibacterial nanostructures based on Zn-MOF compound: design, characterization and a high performance application,*” *Heliyon*, vol. 6, no. 1, p. e03231, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03231.
- [24] C. Gutierrez, “*Colombia entierra anualmente 2 billones de pesos en plásticos que se pueden reciclar,*” *julio*, 2019. [Online] Disponible: <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Comunicacion-Grafica/Noticias/2019/Julio-2019/Colombia-entierra-anualmente-2-billones-de-pesos-en-plasticos-que-se-pueden-reciclar> . [Acceso: Abril 12, 2020] .
- [25] Axioma Group S.A.S., “*Demanda de envases de pet alcanzará us\$60 mil millones, en 2019,*” *julio*, 2014. [Online] Disponible: <https://www.elempaque.com/temas/Demanda-de-envases-de-PET-alcanzara-US60-mil-millones,-en-2019+98629> [Acceso: Abril 12, 2020] .
- [26] L. Ardila and L. Paque, “*Diseño de un plan de negocio para la creación de una empresa recicladora y comercializadora de plástico pet molido y lavado en la ciudad de neiva*

- como opcion de grado para optar el titulo de magister en gerencia de la cadena de abastecimiento,*” universidad ean, 2016. [Online]. Available: https://www.m-culture.go.th/mculture_th/download/king9/Glossary_about_HM_King_Bhumibol_Adulyadej's_Funeral.pdf. [Acceso: Abril 12, 2020] .
- [27] C. Jimenez and J. Meness, “*Estudio de prefactibilidad para la creación de una empresa productora de resinas de plástico recuperado pet (polietilen tereftalato) en la ciudad de bogota,*” Universidad Distrital Francisco Jose De Caldas, 2016 [Online] Disponible: <http://hdl.handle.net/11349/2991> [Acceso: Abril 20, 2020] .
- [28] Sicex Promoting, “*La industria del plástico representa un mercado muy productivo en Colombia,*” octubre, 2019. [Online] Disponible: <https://sicex.com/blog/la-industria-del-plastico-representa-un-mercado-muy-productivo-en-colombia/> [Acceso: Abril 20, 2020] .
- [29] Equipo técnico de la UAESP y PGIRS, “*Plan de gestión integral de residuos solidos 2016-2027,*” UAESP, p. 1228, 2016. [Online] Disponible: http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/direccion/PGIRS_FINAL_18-12-2015.pdf [Acceso: Abril 20, 2020]
- [30] SIAC, “*Posconsumo,*” *Sistema de Información Ambiental de Colombia*, 2020. [Online] Disponible: <https://www.minambiente.gov.co> [Acceso: Abril 20, 2020]
- [31] Mundo Compresor, “*Gas de síntesis,*” 2018. [Online] Disponible: <https://www.mundocompresor.com/diccionario-tecnico/gas-de-sintesis> . [Acceso: Abril 20, 2020]
- [32] K. Roncacio, “*Análisis del reciclaje químico como alternativa tecnológica para la valorización y disposición final de residuos plásticos post-consumo,*” *Univ. Mil. nueva Granada*, pp. 13–14, 2017. [Online] Disponible: <http://hdl.handle.net/10654/16986> [Acceso: Abril 20, 2020]
- [33] E. S. Acevedo, “*Estrategias para aumentar la competitividad en los centros de acopio de reciclaje pet en la ciudad de bogotá periodo 2005-2017,*” *Fundacion Universidad de América*, 2018. [Online] Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6890> [Acceso: Abril 20, 2020]
- [34] Veeduría distrital, “*Diagnostico del Modelo de Aseo en Bogota El nuevo PGIRS VF (13 feb 18),*” *Veeduría Dist.*, p. 90, 2018, [Online]. Available: [http://veedurriadistrital.gov.co/sites/default/files/files/Publicaciones 2018/Diagnostico del](http://veedurriadistrital.gov.co/sites/default/files/files/Publicaciones%202018/Diagnostico%20del)

Modelo de Aseo en Bogota El nuevo PGIRS VF (13 feb 18).pdf.

- [35] C. UAESP, “*Estudio técnico de la caracterización en la fuente de residuos sólidos generados en la Ciudad de Bogotá Distrito Capital,*” *Unidad Adm. Espec. Serv. Públicos*, vol. 1, p. 13, 2017. [Online] Disponible: <https://www.uaesp.gov.co> [Acceso: Abril 20, 2020]
- [36] M. de Ambiente, “*Bogotá debe ser más ambiciosa en el reciclaje y separación en la fuente*”: Ministro de Ambiente,” *Ministro de Ambiente*, 2018. [Online] Disponible: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/> [Acceso: Abril 20, 2020].
- [37] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “*Informe Sectorial de la Actividad de Aprovechamiento 2018,*” *República Colomb.*, p. 115, 2019. [Online] Disponible: https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_sectorial_aprovechamiento_2018.pdf [Acceso: Abril 20, 2020].
- [38] A. Sarmiento, G. Rocha, and R. Cubillos, “*Caracterización de la actividad del reciclaje en Bogotá,*” *Unidad Adm. Espec. Serv. públicos*, p. 79, 2011. [Online] Disponible: https://www.habitatbogota.gov.co/sites/default/files/archivosadjuntos/caracterizacion_de_la_actividad_del_reciclaje_en_bogota%20%281%29.pdf [Acceso: Abril 20, 2020].
- [39] D. Giraldo and L. Pérez, “*Mejorar la cadena de suministro del reciclado de polietileno tereftalato (PET),*” *Esc. Ing. Antioquia*, p. 87, 2015. [Online] Disponible: <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2141> [Acceso: Mayo 20, 2020].
- [40] V. A. Herazo Callejas, J. E. Rincón Delgado, and C. A. Sosa Montaña, “*Formulación y evaluación de un proyecto de inversión para la implementación de un modelo de disposición y recolección de material PET posconsumo en la ciudad de Bogotá D.C.,*” *Univ. Dist. Fr. José Caldas*, vol. 2, no. 1, p. 126, 2018, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [41] Acoplásticos, “200 empresas de bogotá reciclan y transforman cerca de 110 mil toneladas de plástico posconsumo al año,” *ColombiaPlast*, 2019 [Online] Disponible: <https://www.acoplásticos.org/index.php/mnu-noti/330-ns-> [Acceso: Mayo 20, 2020].
- [42] Apropet, “Apropet, cerrando el ciclo de reciclaje PET botella a botella,” *Catálogo del Empaque*, 2016. [Online] Disponible: <https://www.plastico.com/temas/APROPET,-cerrando-el-ciclo-de-reciclaje-PET-botella-a-> [Acceso: Mayo 20, 2020].

- [43] J. A. Vela Celis, R. J. S. Humberto, and J. A. Urrego Roldan, “*Diseño de maquina multifuncional de reciclaje de botellas PET, para el aprovechamiento de material solido con potencial a ser reciclado en una Gestión integral de residuos sólidos.*,” *Univ. Dist. “Francisco José Caldas*, no. June, p. 61, 2016. [Online] Disponible: <http://hdl.handle.net/11349/4737> [Acceso: Mayo 20, 2020].
- [44] M. Solis and S. Silveira, “*Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment*,” *Waste Manag.*, vol. 105, pp. 128–138, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.01.038.
- [45] BCNoticias, “*Colombia entierra anualmente 2 billones de pesos en plásticos que se pueden reciclar*,” *Cámara de comercio de Bogotá*, 2019. [Online] Disponible: <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Comunicacion-Grafica/Noticias/2019/Julio-2019/Colombia-entierra-anualmente-2-billones-de-pesos-en-plasticos-que-se-pueden-reciclar> [Acceso: Mayo 20, 2020].
- [46] J. P. Herrera Ramirez, “*Reciclaje de pet post consumo usando máquinas reverse vending para el acopio del material para el acopio del material*,” *Univ. Pilot. Colomb.*, pp. 1–109, 2015. [Online] Disponible: <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00002884.pdf> [Acceso: Mayo 20, 2020].
- [47] J. Lucero and C. Bracho, “*Diseño de Políticas de Inventario para una Planta de Fabricación y Comercialización de Materiales de Empaques Plásticos*,” *Esc. Super. Politécnica del litoral*, p. 108, 2010. [Online] Disponible: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/31495> [Acceso: Mayo 20, 2020]
- [48] Plasticslemag, “*Los plásticos dan un gran paso hacia la economía circular*,” 2019. [Online] Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7249973>[Acceso: Mayo 20, 2020] .
- [49] Ambiente and Hogar, “*Normatividad reciclaje de plasticos*,” p. 37, 2012. [Online] Disponible:[http://www.andi.com.co/Uploads/PL-2019-N050S_TO_\(plastico\)_20190724.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/PL-2019-N050S_TO_(plastico)_20190724.pdf) [Acceso: Mayo 20, 2020]
- [50] L. Red, “*El proceso de reciclaje de plástico*,” *reciclados Plásticos La Red*, 2017. [Online] Disponible:<https://inspirationhistorical.com/zj3t52wa?key=0f22c1fd609f13cb7947c8cabfe1a90d&submetric=15899232>. [Acceso: Mayo 20, 2020]
- [51] PlasticsEurope, “*Recogida, pretratamiento y clasificación de residuos*,” *Productores de*

- materias plasticas*, 2018. [Online] Disponible: <https://www.plasticseurope.org/es/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/waste-collection-pre-treatment-and-sorting>. [Acceso: Mayo 20, 2020]
- [52] L. Quintero, “*Diseño de una planta de reciclado de Tereftalato de polietileno (PET)*,” p. 175, 2016, [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/59710>.
- [53] Ecoembes, “*Mejora de la reciclabilidad de envases Perfumería y Cosmética*,” *Asoc. Nac. Perfum. y cosmética*, p. 11, 2017. [Online] Disponible: <https://ecoembesthecircularcampus.com/web/app/uploads/2021/01/guia-declaracion-envases-de-productos-de-perfumeria-y-cosmetica.pdf> [Acceso: Mayo 20, 2020]
- [54] M. Moroni and A. Mei, “*Characterization and separation of traditional and bio-plastics by hyperspectral devices*,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8, 2020, doi: 10.3390/APP10082800.
- [55] Anonimo, “*Botellas de plástico*,” *Reciclario*, 2017. [Online] Disponible: <http://reciclario.com.ar/reciclable/botellas-de-agua-mineral/>. [Acceso: Mayo 20, 2020]
- [56] A. Mèndez, “*Detrás de la producción del PET*,” *Plastics Technology Mèxico*, 2016. [Online] Disponible: <https://www.pt-mexico.com/articulos/detras-de-la-produccion-del-pet> Acceso: Mayo 20, 2020]
- [57] C. Argueta, “*Reciclado de Envases PET*,” vol. 1, 2015. [Online] Disponible: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mepi/argueta_a_a/ Acceso: Junio 6, 2020]
- [58] R. R. Cobos, “*El polietilén tereftalato (PET) como envase de aguas minerales*,” *Bol. Soc. Española Hidrol. Medica*, vol. 31, no. 2, pp. 179–190, 2016, doi: 10.23853/bsehm.2017.0212.
- [59] M. Gómez, “*Estudio de la dependencia de la naturaleza química y física de los pigmentos y colorantes en la calidad y procesabilidad de los concentrados de color basados en PET*,” *Univ. EAFIT*, p. 90, 2017. [Online] Disponible: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/12223/Mauricio_Mej%C3%ADaG%C3%B3mez_2017.pdf?sequence=2 Acceso: [Junio 6, 2020]
- [60] Centro nacional de informacion biotecnologica, “*Resumen de compuestos PubChem*,” febrero, 2020. [Online] Disponible: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S102494352009000400003&lng=es

&nrm=iso>. ISSN 1024-9435 Acceso: [Junio 6, 2020]

- [61] Encyclopædia Britannica, “*tinte de antraquinona,*” junio, 2016. [Online] Disponible: <https://www.britannica.com/science/anthraquinone> Acceso: [Junio 6, 2020] .
- [62] G. Mohammadi and M. Razieh, *Chapter 2 - Anthraquinone Dyes*, 5th ed. estados unidos, 2018. [Online] Disponible: <https://www.worldcat.org/title/metal-free-synthetic-organic-dyes/oclc/1046085184> Acceso: [Junio 6, 2020] .
- [63] A. Z. Mu, B. Culturales, and B. Artes, “*Nociones básicas sobre materiales.*” [Online] Disponible: <http://hdl.handle.net/10251/82159> Acceso: [Junio 6, 2020] .
- [64] P. Esteban, Z. Arias, J. Bernardo, P. Nájera, I. C. Hernández, and H. Iván, “*Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual : Una Breve Revisión*” *Fac. ciencias Quim.*, vol. 19, pp. 38–47, 2018 [Online] Disponible: <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/2216/1506>. Acceso: [Junio 6, 2020] .
- [65] P. Nayar, G. Shaw, P. Examiner, and T. H. Yoon, “Process for recycling polyester materials,” 7192988, 2007. [Online] Disponible: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2006039386> Acceso: [Junio 6, 2020] .
- [66] S. Mahendran and M. L. Mahadevan, “*Prioritization of Plastic Recycling Process Using Analytical Hierarchy Process*” *Int. Colloq. Mater. Manuf. Metrol. ICMMM 2014 August 8-9, 2014, IIT Madras, Chennai, India*, no. August, pp. 1–5, 2014, doi: 10.13140/2.1.5064.8969.
- [67] L. H. Xavier and R. Valle, “*Multiple criteria decision making and environmental management through thor system assessment : Plastic Material Waste Destination and Performance Evaluation of Brazilian Construction and Demolition Waste Recycling Facilities – Case Studies,*” no. Dm, p. 5, 2004, doi: 10.13140/2.1.1221.8247.
- [68] P. C. Deshpande, C. Skaar, H. Brattebø, and A. M. Fet, “*Multi-criteria decision analysis (MCDA) method for assessing the sustainability of end-of-life alternatives for waste plastics: A case study of Norway,*” *Sci. Total Environ.*, vol. 719, p. 137353, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137353.
- [69] K. Roncancio and K. Camargo, “*Análisis de alternativas tecnológicas para la*

- valorización y disposición final de residuos plásticos en la ciudad de Manizales,*” Univ. Católica Manizales, vol. 1, p. 124, 2016. [Online] Disponible: <https://xdoc.mx/documents/analisis-de-alternativas-tecnologicas-para-la-valorizacion-y-5dd44cde038e1> Acceso: [Junio 6, 2020] .
- [70] T. O. de Velazquez and I. Y. Noguez, “*Estudio de evaluación de tecnologías alternativas o complementarias para el tratamiento o disposición de los residuos sólidos urbanos,*” Insituto de Ingeniería UNAM, 2009. [Online] Disponible: http://www.ategrus.org/images/stories/residuos/tratamiento/tecnologias_gestion_rsu_mexico.pdf Acceso: [Junio 6, 2020] .
- [71] S. Satapathy, “*An analysis of barriers for plastic recycling in the Indian plastic industry,*” *Benchmarking An Int. J.*, vol. 24, no. 2, pp. 415–430, 2017. <https://doi.org/10.1108/BIJ-11-2014-0103>
- [72] S. Wibowo and H. Deng, “*Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty,*” *Waste Manag.*, vol. 40, pp. 127–135, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.02.035.
- [73] Ministerio de agricultura y ambiente, “*Reciclaje Químico,*” 2013. [Online] Disponible: https://www.minagricultura.gov.co/tramitesservicios/Documents/Reglamento_para_la_produccion_Organica.pdf . Acceso: [Junio 6, 2020]
- [74] Plastics recyclers europe, “*Chemical recycling,*” 2012. [Online] Disponible: <https://www.plasticsrecyclers.eu/chemical-recycling> Acceso: [Junio 6, 2020].
- [75] M. Klug, “*Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa*”. *Revista De Química*, 26(1-2), 37-40.,” *Rev. Quim.*, vol. 26, pp. 1–4, 2012. [Online] Disponible: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547> Acceso: [Junio 6, 2020].
- [76] J. Sotamenou, “*Selection of the Best Solid waste Management Yaounde using an Analytical Hierarchy Process,*” *Adv. Environ. Waste Manag. Recycl.*, vol. 2, no. 1, 2019, doi: 10.33140/aewmr.02.01.02.
- [77] F. Calderón Sáenz, “*La Producción de Combustibles Vehiculares a partir de Plásticos de Deshecho,*” pp. 1–226, 2016. [Online] Disponible: <http://www.drcalderonlabs.com/Procesos/Pirolisis/Proceso%20de%20Pirolisis.pdf> Acceso: [Junio 6, 2020]
- [78] C. Park *et al.*, “*Pyrolysis of polyethylene terephthalate over carbon-supported pd*

- catalyst*,” *Catalysts*, vol. 10, no. 5, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3390/catal10050496.
- [79] A. Siirala, “Assignment 8: Comparison of gasification, pyrolysis and combustion,” *Aalto Univ. Sch. Chem. Technol.*, p. 10, 2013. [Online] Disponible: https://advancedbiofuelsusa.info/wpcontent/uploads/2010/05/8_gasification_pyrolysis_combustionRevised.pdf Acceso: [Junio 6, 2020]
- [80] D. Almeida and M. de F. Marque, “Thermal and Catalytic Pyrolysis of Polyethylene Plastic Waste in Semi,” *Polimeros*, vol. 26, no. 1, pp. 1–8, 2015. [Online] Disponible: <https://www.scielo.br/j/po/a/MyMxF6RjMbk78snK5CbWnXp/?lang=en> Acceso: [Julio 12, 2020]
- [81] F. Gao, “Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels,” *Canterbury Univ.*, 2010. [Online] Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/35463715.pdf> Acceso: [Julio 12, 2020]
- [82] S. M. Alston, A. D. Clark, J. C. Arnold, and B. K. Stein, “Environmental impact of pyrolysis of mixed WEEE plastics part 1: Experimental pyrolysis data,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 21, pp. 9380–9385, 2011, doi: 10.1021/es201664h.
- [83] P. Ríos and M. Calvo, “Proyecto De Biocombustible: Planta De Pirólisis,” *Inst. Tecnológico Buenos Aires*, p. 167, 2011. [Online] Disponible: <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/768> Acceso: [Julio 12, 2020]
- [84] BASF, “Plastic Energy: Practical examples - Pyrolysis plants.” Sevilla, p. 1, 2020. [Online] Disponible: <https://www.basf.com/vn/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy-at-basf12/mass-balance-approach/chemcycling/dialog-forum-chemical-recycling.html> Acceso: [Julio 12, 2020]
- [85] A. Greenwood, “NSIGHT: New chemical-recycling technologies proliferate,” *Indep. Commod. Intell. Serv.*, p. 1, 2020. [Online] Disponible: <https://www.icis.com/explore/resources/news/2020/03/12/10481848/insight-new-chemical-recycling-technologies-proliferate> Acceso: [Julio 12, 2020]
- [86] L. E. Arteaga-Pérez and L. Casas-Ledón, Yannay; Cabrera-Hernández, Jagni; Rodríguez, “Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación,” *Cent. Estud. Energéticos y Technol. Ambient.*, no. 5641, pp. 138–145, 2014. [Online] Disponible: https://www.researchgate.net/publication/264541344_Gasificacion_de_biomasa_para_la_produccion_sostenible_de_energia_Revision_de_las_tecnologias_y_barreras_para_su_aplic

- acion Acceso: [Julio 12, 2020]
- [87] U. Vadillo, “*Producción De Hidrógeno a Partir De Plásticos Mediante Pirólisis Y Reformado Catalítico En Línea,*” *Univ. del país Vasco*, p. 42, 2014. [Online] Disponible: <http://hdl.handle.net/10810/15229> Acceso: [Julio 12, 2020]
- [88] R. Anderson, “*Gasificación del carbón: ¿la energía limpia del futuro?*,” *BBC*, 2014. [Online] Disponible: <https://acento.com.do/bbc-news-mundo/gasificacion-del-carbon-la-energia-limpia-del-futuro-3155412.html> Acceso: [Julio 12, 2020].
- [89] P. López, “*Incineración Como Tratamientos De Gestión,*” *Inst. Tecnológico Y Estud. Super. Monterrey*, p. 143, 2010. [Online] Disponible: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/71338/fichero/TFM-1338-LOPEZ.pdf> Acceso: [Julio 12, 2020].
- [90] D. Quintero, “*Basura cero puerto rico,*” *BCPR*, 2015. [Online] Disponible: <http://www.basuraceropr.org/sobre-nosotros.html>. Acceso: [Julio 12, 2020].
- [91] E. Varias, “*Incineracion,*” *Reciclame*, 2011. [Online] Disponible: <https://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/incineracion/> Acceso: [Julio 12, 2020].
- [92] M. Noriega, “*Recuperación energética de los residuos plásticos: una gran oportunidad,*” 2016. [Online] Disponible: <https://www.plastico.com/temas/Recuperacion-energetica-de-los-residuos-plasticos,-una-gran-oportunidad+114752> Acceso: [Julio 12, 2020].
- [93] F. Awaja and D. Pavel, “*Recycling of PET,*” *Eur. Polym. J.*, vol. 41, no. 7, pp. 1453–1477, 2005, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005.
- [94] P. Espinoza, “*Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos,*” *Asoc. Interam. Ing. Sanit. y Ambient.*, p. 203, 2018. [Online] Disponible: <https://aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/08/gestion-integral-de-residuos-solidos-urbanos-libro-aidis.pdf> Acceso: [Julio 12, 2020].
- [95] F. M. Mohamed, “*Evaluación de los impactos ambientales de una incineradora de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía mediante el análisis de ciclo de vida,*” *Universidad de malaga*, 2015. [Online] Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=80135> Acceso: [Julio 12, 2020].
- [96] M. Mensink, “*Chemical Recycling:,*” *Europe*, 2020. [Online] Disponible: <https://chemicalwatch.com/98760/guest-column-how-chemical-recycling-could-accelerate-safe-plastic-recycling-in-the-eu-sub-do-not-publish> Acceso: [Julio 12, 2020].

- [97] I. García-herrero, “Energía embebida y huella de carbono en la gestión de residuos de alimentos,” *Univ. Cantab.*, 2018. [Online] Disponible: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/14850/SGC.pdf?sequence=1> Acceso: [Julio 12, 2020].
- [98] R. Estevez, “Cuando el plástico se convierte en energía,” 2010. [Online] Disponible: <https://www.ecointeligencia.com/2010/11/cuando-el-plastico-se-convierte-en-energia/> Acceso: [Julio 12, 2020].
- [99] Omar Alí Blandón Cruz, “Evaluación del Proceso de Reciclaje de Polímeros Matagalpa 2012,” *Univ. Nac. Auton. Nicar. unan farem matagalpa*, pp. 1–15, 2013. [Online] Disponible: <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/7043> Acceso: [Julio 12, 2020].
- [100] A. B. Raheem, Z. Z. Noor, A. Hassan, M. K. Abd Hamid, S. A. Samsudin, and A. H. Sabeen, “Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 225, pp. 1052–1064, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.019 [Acceso: septiembre 2, 2020]
- [101] A. Mendez (01, sep, 2020). “Reciclaje Químico Una Reflexión Técnica Sobre La Despolimerización Del PET,”. *plastics technology*. [En línea]. <https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclado-quimico-una-reflexion-tecnica-sobre-la-depolimerizacion-del-pet->. [Acceso: 8, oct, 2020].
- [102] ICIS. (s.f). “Purified Terephthalic Acid (PTA) Prices and Pricing Information”. [En línea]. <https://www.icis.com/explore/resources/news/2007/11/06/9076460/purified-terephthalic-acid-pta-prices-and-pricing-information/> [Acceso: 10, sept, 2011].
- [103] ITW Reagents. “Etilenglicol puro”. [En línea]. <https://www.itwreagents.com/iberia/es/product/etilenglicol-puro/141316>. [Acceso: 10, sept, 2020].
- [104] A. Aguado *et al.* “Chemical depolymerisation of PET complex waste: Hydrolysis vs. glycolysis.” *J. Mater. Cycles Waste Manag.* vol. 16. no. 2. pp. 201–210. Agosto, 2013, doi: 10.1007/s10163-013-0177-y. [Acceso: septiembre 15, 2020].
- [105] A. E. Padilla Alomoto, “Diseño del proceso para la obtención de resina de poliéster insaturada mediante el reciclaje químico de desechos de polietilentereftalato (PET),” tesis pre. Facultad de ingenierías, *Esc. Politec. Nac*, Quito, Ecuador, 2014.
- [106] H. Kurokawa, M. A. Ohshima, K. Sugiyama, and H. Miura, “Methanolysis of

- polyethylene terephthalate (PET) in the presence of aluminium tiisopropoxide catalyst to form dimethyl terephthalate and ethylene glycol,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 79, no. 3, pp. 529–533, 2003, doi: 10.1016/S0141-3910(02)00370-1. [Acceso: septiembre15, 2020].
- [107] CHemicalBook, “Dimethyl terephthalate Price,”. [En linea]. <https://www.chemicalbook.com/Price/DIMETHYL-TEREPHTHALATE.htm>. [Acceso: septiembre17, 2020].
- [108] A. M. Al-Sabagh, F. Z. Yehia, G. Eshaq, A. M. Rabie, and A. E. ElMetwally, “Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate,” *Egypt. J. Pet.*, vol. 25, no. 1, pp. 53–64, 2016, doi: 10.1016/j.ejpe.2015.03.001. [Acceso: septiembre 18, 2020].
- [109] V. Sinha, M. R. Patel, and J. V. Patel, “Pet waste management by chemical recycling: A review,” *J. Polym. Environ.*, vol. 18, no. 1, pp. 8–25, 2010, doi: 10.1007/s10924-008-0106-7. [Acceso: septiembre 21, 2020].
- [110] C. Pudack, M. Stepanski, and P. Fässler, “PET Recycling – Contributions of Crystallization to Sustainability,” *Chemie-Ingenieur-Technik*, vol. 92, no. 4, pp. 452–458, 2020, doi: 10.1002/cite.201900085. [Acceso: septiembre 21, 2020].
- [111] J.Florez and A.Godoy, “*Evaluacion de cómpositos, en el proceso de despoimerización a través de glicólisis en botellas plásticas recicladas de PET (polietilen tereftalato)*,” tesis pre. Facultad de ingenierías, universidad coperativa de colombia, Villavicencio, Colombia, 2017.
- [112] M. C. Ardila, “*Evaluacion de alternativas de descomposicion quimica para el tratamiento de residuos del tereftalato de polietieno PET*”, tesis pre. Facultad de ingenierías, Universidad Los Andes, Bogota, Clombia, 2004.
- [113] CHemicalBook, “TEREPHTHALIC ACID BIS(2-HYDROXYETHYL) ESTER Price,”.[En linea]. <https://www.chemicalbook.com/Price/959-26-2.htm>. [Acceso: octubre 3, 2020].
- [114] L. Bartolome, M. Imran, K. G. Lee, A. Sangalang, J. K. Ahn, and D. H. Kim, “Superparamagnetic γ -Fe₂O₃ nanoparticles as an easily recoverable catalyst for the chemical recycling of PET,” *Green Chem.*, vol. 16, no. 1, pp. 279–286, 2014, doi: 10.1039/c3gc41834k. [Acceso: octubre 5, 2020].

- [115] Jeplan (s.f), “Axens, IFPEN and JEPLAN join their forces to demonstrate and commercialize an innovative process for the recycling of all types of waste PET”. [En línea]. <https://www.jeplan.co.jp/en/2020/09/11/8794/>. [Acceso: octubre 6, 2020].
- [116] E. S. Barboza, D. R. Lopez, S. C. Amico, and C. A. Ferreira, “Determination of a recyclability index for the PET glycolysis,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 53, no. 3, pp. 122–128, 2009, doi: 10.1016/j.resconrec.2008.10.002. [Acceso: octubre 6, 2020].
- [117] M. Peña, y C. Barrionuevo, “Grupo Focal y Procesos de Jerarquía Analítica para la determinación y ponderación de los factores críticos de éxitos en los proyectos de software,” *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 15, no. 4, pp.743–746, mayo.2016. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Miriam-Pena-Gonzalez/publication/303383178_Focus_Group_and_Analytic_Hierarchy_Process_for_identifying_and_weighting_software_project_critical_success_factors/links/573f86cf08ae298602e8f5bc/Focus-Group-and-Analytic-Hierarchy-Process-for-identifying-and-weighting-software-project-critical-success-factors.pdf. [Acceso: octubre 5, 2020].
- [118] A. Cabello, “*Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones*”, tesis pre. Facultad de ciencias empresariales, Universidad la rioja, La rioja, España, 2017.
- [119] G. Sanchez (2003). "Técnicas Participativas para la Planeación Procesos Breves de Intervención". Fundacion ICA. [En línea]. <https://eloisacademas.files.wordpress.com/2017/03/sc3a1nchez-guerrero-tecnicas-participativas-para-la-planeacion.pdf>. [Acceso: octubre 10, 2020].
- [120] T. Satty, “How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process,” *J. Appl. Anal.*, vol. 24, no. 6, p. 25, 1994, doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I. [Acceso: octubre 5, 2020].
- [121] G. Real (9, sep, 2018), “Análisis jerárquico de decisión,”.[En línea]. https://www.youtube.com/watch?v=CVujmCCFv_k . [Acceso: octubre 10, 2020].
- [122] D. Moreno, M. Angélica, B. Henríquez, M. Camargo, Y. Fernanda, and V. Becerra, “Aplicación de métodos multicriterio para el soporte de selección de proveedores en la empresa Provemel Ltda,” tesis pre. Facultad de ingenierías, Pontificia universidad javeriana, Bogota, Colombia, 2017.
- [123] J. L. García-alcaraz and U. D. C. Rica, “Aplicación del proceso de jerarquía analítica en la selección de tecnología agrícola Agronomía Costarricense San José , Costa Rica,” *Rev.*

- Agron. costaricense*, vol. 30, no. 1, p. 10, mar. 2006. [En línea] Disponible en:
<https://www.redalyc.org/pdf/436/43630110.pdf>. [Acceso: octubre 10, 2020].
- [124] A. Mendoza and C. S. Daniel, “Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment,” *Rev. Chil. ingeniería*, vol. 27, no. 3, pp. 348–360, sept .2019. [En línea]. Disponible en:
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052019000300348. [Acceso: octubre 27, 2020].
- [125] Cymit Química S.L., “Bis(2-hydroxyethyl) Terephthalate 959-26-2 3B-B3429,” *Grupo Palex*, 2020. [En línea]. <https://cymitquimica.com/>. [Acceso: octubre 27, 2020].
- [126] P. AppliChem, “Ethyleneglycol Excipients And Raw Materials,” *Itwreagents.com*, 2019. [En línea]. <https://itwreagents.com/rest-of-world/en/home-rw>. [Acceso: octubre 27, 2020].
- [127] Alfa Aesar, “497-19-8 - Sodium carbonate, anhydrous”, 2020, [En línea].
<https://www.alfa.com/es/catalog/011552/>. [Acceso: octubre 27, 2020].
- [128] Acoplásticos (2020), “Encuesta mensual de precios del mercado de reciclaje en colombia,” [En línea].
https://www.acoplásticos.org/acceso_clientes/imagenes/ENCUESTA_MENSUAL_DE_PRECIOS_DEL_MERCADO_DE_RECICLAJE_EN_COLOMBIA_MAYO_2020.pdf. [Acceso: octubre 30, 2020].
- [129] Precio Gas (2021), “Precio del GLP para viviendas y vehículos,” [En línea].
<https://precioGas.com/instalaciones/glp/precios>. [Acceso: mayo 3, 2021].
- [130] quimics dalmau (2020), “Acido Benzoico,” [En línea]
<https://quimicsdalmauonline.com/tienda/acido-benzoico/>. [Acceso: mayo 3, 2021].
- [131] Alibaba (2021), “99 pureza de frutos de etileno c2h4 líquido etileno.” [En línea]
<https://spanish.alibaba.com/product-detail/buy-99-95-high-purity-ethylene-c2h4-gas-for-fruit-ripening-62426199150.html>. [Acceso: mayo 3, 2021].
- [132] Alibaba (2021), “99.9%-99.999% de dióxido de carbono CO2 Gas precio por KG,” [En línea] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/99-9-99-999-carbon-dioxide-co2-gas-price-per-kg-60658726927.html>. [Acceso: mayo 3, 2021].
- [133] Pharma compas (2021), “price oxygen,” [En línea]
<https://www.pharmacompass.com/price/oxygen>. [Acceso: mayo 3, 2021].

- [134] Alibaba (2021), “monóxido de carbono industrial,” [En línea]
<https://spanish.alibaba.com/g/carbon-monoxide-price-in-kg.html>. [Acceso: mayo 5, 2021].
- [135] Automotive (2019), “Cuánto cuesta y cómo se produce el hidrógeno,”[En línea]
<https://noticias-renting.aldautomotive.es/produccion-hidrogeno-automocion/>. [Acceso: mayo 5, 2021].
- [136] Pharma compass (2019), “Sulfuric Acid API reference price”,[En línea]
<https://www.pharmacompass.com/price/sulfuric-acid>. [Acceso: mayo 6, 2021].
- [137] Pharma compass (2016), “terephthalic Acid API reference price”, [En línea]
<https://www.pharmacompass.com/active-pharmaceutical-ingredients/terephthalic-acid/api-price-information/api-reference-price>. [Acceso: mayo 6, 2021].
- [138] Pharma compass (2016), “Methanol API reference price,”, [En línea]
<https://www.pharmacompass.com/price/methanol>. [Acceso: mayo 6, 2021].
- [139] Sigma-Aldrich (2021), “Zinc acetate reagent grade,” [En línea]
<https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigald/z0625?lang=en®ion=CO>.
 [Acceso: mayo 6, 2021].
- [140] Procédé De Glycolyse Du Poly(Téréphtalate D'Éthylène) En Deux Étapes Réactionnelles
 Domaine, por V. Coupard and F. Hugues. (2016, junio, 23).WO2016096767A1 [En
 línea].Disponible en: <https://patents.google.com/patent/WO2016096767A1/fr>.
- [141] S. K. Gómez and J. F. de la Cruz Morales, “Application of heuristic rules in the process
 synthesis,” *Dyna*, vol. 76, no. 158, pp. 155–166, 2009. [En línea]. Disponible en:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0012-73532009000200015&lng=en&nrm=iso [Acceso: marzo 5, 2021].
- [142] R. Smith, *Chemical Process Design and Integration*, 3rd ed. london, 2005.
- [143] J. M. Douglas, *Conceptual design of chemical processes*, 1° Edition. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [144] R. López-Fonseca, I. Duque-Ingunza, B. de Rivas, L. Flores-Giraldo, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, “Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate,” *Chem. Eng. J.*, vol. 168, no. 1, pp. 312–320, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.01.031. [Acceso: marzo 8, 2021].
- [145] Periodico el pais (2019), “Reciclar botellas, el ‘antídoto’ de la contaminación por plástico”,[En línea] <https://www.elpais.com.co/medio-ambiente/reciclar-botellas-antidoto->

- de-la-contaminacion-por-plastico.html. [Acceso: marzo 8, 2021].
- [146] S. Hann and T. Connock, “Chemical Recycling : State of Play Report for CHEM Trust,” Chem Trust, Reino Unido 2020.[En línea]. Disponible en: <https://chemtrust.org/wp-content/uploads/Chemical-Recycling-Eunomia.pdf>. [Acceso: abril 8, 2021].
- [147] Acoplásticos (2016), “Directorio Colombiano de Reciclaje 2016-2017,” *Acoplásticos*, [En línea]
<https://www.acoplásticos.org/AFshjuraaF47lfjbOSTNKYs4831gepsfiq57DRCFws38164LXIEMF14h2nkr/dcr17/5/>. [Acceso: marzo 8, 2021].
- [148] ARB ESP (2021), “Asociación Cooperativa de Recicladores de Bogotá - Servicios,” *Asociación Cooperativa de Recicladores de Bogotá -*, [En línea]
<https://asociacionrecicladoresbogota.org/>. [Acceso: marzo 8, 2021].
- [149] I. Duque-Ingunza, R. López-Fonseca, B. de Rivas, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, “Process optimization for catalytic glycolysis of post-consumer PET wastes,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 89, no. 1, pp. 97–103, 2014, doi: 10.1002/jctb.4101. [Acceso: marzo 12, 2021].
- [150] E. Medina (2018), “Diseño de Procesos,” Instituto Politécnico Nacional, [En línea]
<https://sites.google.com/site/procesosesiqie/material-para-pruebas>. [Acceso: marzo 14, 2021].
- [151] N. J. Scenna and S. J. Benz. (1999). "Introducción al Diseño de Procesos Químicos. Breves Nociones". [En línea]. Disponible en:
https://www.academia.edu/22271137/CAP%C3%8DTULO_II_INTRODUCCI%C3%93N_AL_DISE%C3%91O_DE_PROCESOS_QU%C3%8DMICOS._BREVES_NOCIONES
- [152] A. B. Raheem *et al.*, “Process simulation of bis (2- Hydroxyethyl) terephthalate and its recovery using two-stage evaporation systems,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 63, no. May, pp. 655–660, 2018, doi: 10.3303/CET1863110. [Acceso: marzo 18, 2021].
- [153] J. V. Rojas, L. Stinguel, M. R. Wolf-Maciel, and R. Guirardello, “Modeling and simulating complete extractive distillation process of ethanol-water mixture using equilibrium-stage distillation model and efficiency correlations (Barros & Wolf) on EMSO platform,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 50, pp. 331–336, 2016, doi: 10.3303/CET1650056. [Acceso: marzo 12, 2021].
- [154] H. W. Goh, A. Salmiaton, N. Abdullah, and A. Idris, “Time, temperature and amount of

- distilled water effects on the purity and yield of Bis(2-hydroxyethyl) terephthalate purification system,” *Bull. Chem. React. Eng. & Catal.*, vol. 10, no. 2, pp. 143–154, 2015, doi: 10.9767/bcrec.10.2.7195.143-154. [Acceso: marzo 13, 2021].
- [155] M. Khoonkari, A. H. Haghighi, Y. Sefidbakht, K. Shekoohi, and A. Ghaderian, “Chemical Recycling of PET Wastes with Different Catalysts,” *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, no. December 2018, 2015, doi: 10.1155/2015/124524. [Acceso: marzo 12, 2021].
- [156] A. Norhafizah and A. Salmiaton, “Glycolysis Of Poly (Ethylene Terephthalate) (PET) Waste Under Conventional Convection-Conductive Glycolysis,” *Dep. Chem. Environ. Eng. Fac. Eng. Univ. Putra Malaysia*, vol. 1, no. 10, pp. 46–54, 2018. [Acceso: marzo 12, 2021].
- [157] S. R. Shukla and K. S. Kulkarni, “Depolymerization of poly(ethylene terephthalate) waste,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 85, no. 8, pp. 1765–1770, 2002, doi: 10.1002/app.10714. [Acceso: marzo 12, 2021].
- [158] Aimplas (2015), “Coloración en plásticos: cómo elegir una tinta o pigmento”, [En línea] <https://www.aimplas.es/blog/coloracion-en-plasticos-como-elegir-una-tinta-o-pigmento/>. [Acceso: marzo 13, 2021].
- [159] canales sectoriales interempresas (2013), “Aditivos y masterbatches: tipos, funciones y aplicaciones,” [En línea] <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/111679-Aditivos-y-masterbatches-tipos-funciones-y-aplicaciones.html>. [Acceso: marzo 13, 2021].
- [160] R. Felder, *principios elementales de los procesos químicos*, 3rd ed. MEXICO, 2004.
- [161] D. Muhammad and N. Aziz, “Simulation and sensitivity study of industrial low density polyethylene tubular reactor,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 56, no. 2002, pp. 757–762, 2017, doi: 10.3303/CET1756127.
- [162] Aspentech, “Polymer process engineering,” *Chem. Eng. Prog.*, vol. 84, no. 11, pp. 16–17, 1988.
- [163] A. Sadat-Shojaei, M. R. Khorsand Movaghar, and S. A. Mousavi Dehghani, “Prediction of Sanchez-Lacombe equation of state characteristic parameters for plus fractions,” *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 93, no. 8, pp. 1483–1489, 2015, doi: 10.1002/cjce.22224. [Acceso: marzo 20, 2021].
- [164] D. Andre, “Gasificación térmica y catalítica de residuos sólidos de PET”, tesis pre. Facultad de ingenierías, Universidad Central De Ecuador, Quito, Ecuador, 2013.

- [165] Aspen Tech, *polymers plus, proces modeling*, 3rd ed. USA, 1997. [En línea]. Disponible en:
<https://sites.chemengr.ucsb.edu/~ceweb/courses/che184b/aspenplus/PolymersPlusUserGuideVolume1.pdf>. [Acceso: marzo 20, 2021].
- [166] J. Tirenti, “API 650 - tanques de almacenamiento , Parte I :,” EE.UU, 2014.
- [167] D. Chivata and C. Duarte, “Diseño concetual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis,” tesis pre. Facultad de ingenierias, Fundacion Universidad De America, Bogota, Colombia 2018.
- [168] S. Burbano, “Diseño de un módulo de intercambiadores de calor de coraza y ubos soonia,” tesis pre. Facultad de ingenierías, Universidad Santo Tomas, Bogota, Colombia 2014.
- [169] A. Veloza, “Simulacion de distintos modelos de intercambiaores de calor en “Aspen Plus”,” tesis pre. Facultad de ingenierias, Universidad los andes, Bogota, Colombia, 2004.
- [170] I. D. G. Chaves, J. R. G. López, J. L. G. Zapata, A. L. Robayo, and G. R. Niño, *Process analysis and simulation in chemical engineering*, 1st ed. NWE YORK, 2015.
- [171] A. Moral and A. Tejeiro, “Diseño de un cambiador de calor mediante ASPEN PLUS,” esis pre. Facultad de ingenierias, Universidad complutense ,Sevilla, España 2011.
- [172] J. Haydary, *Chemical Process Design and Aspen Plus and Aspen HYSYS Applications*. 2019.
- [173] M. Kamal, *chemical engineering aplicaciones*, 1st ed., vol. 53, no. 9. 2013.
- [174] E. Silva, “*Simulación de intercambiadores de calor, diseño de redes de intercambio calórico y estimación de costos usando aspen,*” universidad de magallanes, 2012.
- [175] G. Maroto and M. Teresa, “Diseño de intercambiadores de calor,” *Ejercítate*, vol. 35. Bogota, pp. 20–34, 2020.
- [176] A. P. Sánchez, E. R. González, E. P. Sánchez, N. Liaño, and C. G. Sicilia, “Diseño térmico de un intercambiador de calor de tubo y coraza para el enfriamiento de metanol Thermal design of a shell-and-tube heat exchanger for methanol cooling,” *Rev. Cient.*, vol. 33, no. 2, pp. 753–776, 2020.
- [177] C. Jacobo, “Design and Analysis of a Heat Exchanger,” Universidad de cantabria, 2018.
- [178] A. Galvis, “*diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de cartagena (rcsa),*” *universidad san buenaventura cartagena*, 2014.

- [179] W. McCabe, *Operaciones unitarias en ingeniería química*, Séptima ed. Ciudad de México, 2012.
- [180] A. Calamares, “Tipos de filtros,” 2016. .
- [181] M. Prado, “Diseño básico del proceso de desulfurización en el reciclaje de baterías ácido-plomo,” Facultad de ciencias e ingeniería, 2005.
- [182] Aspen Technology Inc., “Aspen Capital Cost Estimator: User’s Guide,” Burlington, 2012.
- [183] 911 metallurgist, “Filtro A Vacío De Discos,” 2019. .
- [184] Estragua Technology For Life, “Filtro rotativo de discos,” 2017. .
- [185] J. Haydary, “Solid Handling,” *Chem. Process Des. Simul.*, pp. 155–171, 2019, doi: 10.1002/9781119311478.ch7.
- [186] H. M. Irfan Anwar, “Simulation of Solid Processes by Aspen Plus,” *Lappeenranta Univ. Technol.*, pp. 1–106, 2011.
- [187] H. . Goh, A. Salmiaton, N. Abdullah, and A. Idris, “Process Simulation of Two-stage Evaporation and Crystallization Systems for Bis(2-hydroxyethyl) terephthalate Recovery,” *J. Appl. Sci.*, vol. 1, p. 10, 2012.
- [188] Mitex, “Mixer PET Crystallizer hopper dryer,” *Mitex Automation plastics systems*, 2016. <http://www.mitexltd.com/Productlist.asp?sortid=119>.
- [189] Á. L. Villanueva Perales, “Simulación Y Optimización De Procesos Químicos Guía De La Práctica 2,” *Dep. Ing. Quim. Univ. Sevilla*, 2010, [Online]. Available: <http://www.cartagena99.com/recursos/fisica/apuntes/Aspen-Guia practica 2 definitiva .pdf>.
- [190] K. Kolmetz and A. Dwijayanti, “Distillation Column Tray Hydraulics Selection, Sizing and Troubleshooting, Kolmetz Handbook Of Process Equipment Design,” *Kolmetz Handb. Process Equip. Des.*, no. March, pp. 1–19, 2011, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/340234341_distillation_column_reboiler_selection_sizing_and_troubleshooting_Kolmetz_Handbook_Of_Process_Equipment_Design.
- [191] M. A. Zubir, A. N. Rahimi, M. F. Islam Zahran, M. Z. Shahrudin, K. A. Ibrahim, and M. K. Abd Hamid, “Systematic design of energy efficient extractive distillation column for azeotrope mixture,” *Energy Procedia*, vol. 142, no. January 2018, pp. 2636–2641, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.204.
- [192] I. D. Gil, A. M. Uyazán, J. L. Aguilar, G. Rodríguez, and L. A. Caicedo, “Separation of ethanol and water by extractive distillation with salt and solvent as entrainer: Process

- Simulation,” *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 207–215, 2008, doi: 10.1590/S0104-66322008000100021.
- [193] Hebei GN Solids Control.Co, “Plastic Recycling Decanter Centrifuge,” *SOLIDS CONTROL & WASTE MANAGEMENT*, 2018. .
- [194] R. Esquivel, “Evaluacion economica preliminar de plantas quimicas usando aspen icarus process evaluator,” universidad de las americas puebla, 2007.
- [195] S. Hajipour, “Economic Evaluation using Aspen HYSYS,” *Processecology.com*, pp. 1–3, 2014, [Online]. Available: <https://processecology.com/articles/economic-evaluation-using-aspen-hysys%0Ahttp://processecology.com/articles/economic-evaluation-using-aspen-hysys>.
- [196] Alibaba, “Precio del reactor químico / Precio del reactor por lotes / Precio del reactor revestido de vidrio,” 2020. .
- [197] Nanjing Jinri Light Industry Technology Development Co, “Processing Equipment Stainless Steel Crystallizer Tank,” *Nanjing Jinri Light, Lishui Industrial Zone, China*, 2019. .
- [198] A. Mahmoud, “Cost estimation of MTBE plant cost,” *Sudan University Of Science & Technology*, 2017. .
- [199] Matches, “atmospheric Centrifuge equipment cost,” *Matches, certified engineering company 2005 N Mistletoe LN Edmond, Oklahoma City*, 2014. .
- [200] A. P. Sánchez, E. R. González, E. P. Sánchez, N. Liaño, and C. G. Sicilia, “Diseño térmico de un intercambiador de calor de tubo y coraza para el enfriamiento de metanol Thermal design of a shell-and-tube heat exchanger for methanol cooling,” *Rev. Univ. Nac. ingeniería*, vol. 20, no. 10, pp. 753–776, 1995.
- [201] Alibaba, “Xinren-carcasa y tubo intercambiador de calor de acero inoxidable, alta calida,” 2020. .
- [202] Alibaba, “Filtro de tambor de vacío rotativo a precio de fábrica, filtros de tambor rotativo Costo de fabricantes,” 2020. .
- [203] Alibaba, “Filtro de vacío para disco cerámico para máquina de deshidratación de lodos,” 2020. .
- [204] Alibaba, “Tanque de mezcla Vertical Industrial de larga vida útil con agitador,” 2020. .
- [205] S. Benchmarker, “Copper Steel Price History Tables and Charts,” 2021. [Online].

Available: <http://steelbenchmarker.com/history.pdf>.

[206] L. MEPS International, “World Stainless Steel Prices,” 2021. [Online]. Available: <https://www.meps.co.uk/gb/en/products/world-stainless-steel-prices>.

ANEXO 1.

EXPLICACIÓN DE LA VALORIZACIÓN DE LOS CRITERIOS

Para tener mayor claridad de la forma en cómo se obtuvieron los pesos para cada uno de los criterios, se realizó la siguiente explicación.

La valorización de los criterios se realiza por pares, donde el criterio que tenga mayor importancia respecto al otro se pondrá el número entero de la escala de Satty que el investigador considere, dicho entero es ingresado en la intersección de la fila donde está el criterio de mayor importancia y la columna donde está el criterio de menor importancia, en cuanto al valor del criterio de menor importancia respecto al de mayor importancia es ingresado el inverso del valor entero que se ingresó para el criterio de mayor importancia, igualmente este inverso es ingresado en la intersección entre la fila del criterio de menor importancia y la columna del criterio de mayor importancia, esta explicación se puede observar a continuación con la valorización del criterio energético.

Como se menciona en el capítulo 3 uno de los criterios que se pudieron determinar por medio de la literatura es el consumo de energía, con dicho criterio se busca disminuir la energía utilizada en el proceso, según la mayoría de artículos es el tercer criterio con mayor peso respecto a los criterios que se tuvieron en cuenta para este proyecto, uno de los artículos consultados es *“Prioritization of Plastic Recycling Process Using Analytical Hierarchy Process Prioritization of Plastic Recycling Process Using Analytical Hierarchy Process”*. por lo tanto siempre se tuvo en cuenta los resultados arrojados por los diferentes artículos consultados. Para la valorización del criterio del consumo de energía respecto al criterio de menor contaminación el investigador del proyecto dio un valor de 3 de la escala de Satty que se encuentra en la tabla 8, lo que quiere decir que para el investigador el de menor contaminación es de moderada importancia respecto al consumo de energía.

Tabla 35.

Ejemplo uno asignación y valorización de criterios

	Consumo de energía	Contaminación
Consumo de energía	1	1/3
Contaminación	3	

Menor importancia

Mayor importancia

Nota. La tabla muestra un ejemplo de asignación de valores para los criterios

Para la valorización del criterio del consumo de energía respecto al criterio del valor del producto el investigador del proyecto dio un valor de 5 de la escala de Satty, lo que quiere decir que para el investigador el consumo de energía tiene una importancia esencial o fuerte sobre el valor del producto generado, ya que según artículos como “*Multi-criteria decision analysis (MCDA) method for assessing the sustainability of end-of-life alternatives for waste plastics: A case study of Norway*” la energía esta en el lugar 3 con mayor peso y el ambiental en el lugar 2, por lo tanto es bastante importante que el proceso consuma menor energía ya que esto disminuye los costos fijos y no se utiliza gran cantidad de recursos naturales, cabe aclarar que generar un producto con alto valor agregado es importante para los ingresos, sin embargo de nada sirve un producto con alto valor pero que genere una gran cantidad de gastos energéticos.

Tabla 36.

Ejemplo dos asignación y valorización de criterios

	Consumo de energía	Contaminación	Valor del producto
Consumo de energía	1	1/3	5
Contaminación	3	1	3
Valor del producto	1/5		1

Mayor importancia

Menor importancia

Nota. La tabla muestra un ejemplo de asignación de valores para los criterios

Para la valorización del criterio del consumo de energía respecto al criterio de los pasos del proceso el investigador del proyecto dio un valor de 3 de la escala de Satty, lo que quiere decir que para el investigador el consumo de energía tiene una importancia moderada sobre los pasos del proceso, ya que según artículos como *“Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty”*, los pasos del proceso se encuentran en un lugar de 3 mientras que el criterio económico en un lugar de 1, lo que muestra que los pasos de un proceso son importantes pero mayor importancia es el gasto que se genere

Tabla 37.

Ejemplo tres asignación y valorización de criterios

	Consumo de energía	Contaminación	Valor del producto	Pasos del proceso
Consumo de energía	1	1/3	5	3
Contaminación	3	1		
Valor del producto	1/5		1	
Pasos del proceso	1/3			1

Nota. La tabla muestra un ejemplo de asignación de valores para los criterios

Para la valorización del criterio del consumo de energía respecto al criterio de la capacidad industrial el investigador del proyecto dio un valor de 3 de la escala de Satty, lo que quiere decir que para el investigador el consumo de energía tiene una importancia moderada sobre los pasos del proceso, ya que según artículos como *“Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty”*, los pasos del proceso se encuentran en un lugar de 3 mientras que el criterio económico en un lugar de 1, lo que muestra que los pasos de un proceso son importantes pero mayor importancia es el gasto que se genere.

Tabla 38.*Ejemplo cuatro asignación y valorización de criterios*

	Consumo de energía	Contaminación	Valor del producto	Pasos del proceso	Capacidad instalada
Consumo de energía	1	1/3	5	3	3
Contaminación	3	1			
Valor del producto	1/5		1		
Pasos del proceso	1/3			1	
Capacidad instalada	1/3				1

Nota. La tabla muestra un ejemplo de asignación de valores para los criterios

De la manera en la que se realizó la valorización del criterio energético se realizó para las otras 4 alternativas, como se pudo observar el investigador siempre tomo como guía la literatura para dar el peso a cada criterio, a continuación, se puede observar la matriz totalmente valorizada donde después de ingresar los valores para cada criterio se realizó la suma por columna.

Tabla 39.*Asignación y Suma de criterios*

	Consumo de energía	Contaminación	Valor del producto	Pasos del proceso	Capacidad instalada
Consumo de energía	1	1/3	5	3	3
Contaminación	3	1	3	7	5
Valor del producto	1/5	1/3	1	5	2
Pasos del proceso	1/3	1/7	1/5	1	1/3
Capacidad instalada	1/3	1/5	1/3	1/2	1
Suma	4,8	2,00	9,53	16,5	11,33

Nota. La tabla muestra la asignación y suma de los criterios

La suma de la matriz valorizada se realiza con el fin de sacar la normalización de la matriz con el objetivo de sacar la suma por filas de los pesos de los criterios, dicha normalización y suma se realiza de la siguiente manera

Tabla 40.*Resultado de valorización de los criterios*

	Consumo de energía	Contaminación	Valor del producto	Pasos del proceso	Capacidad instalada	Suma Pesos
Consumo de energía	$\frac{1}{4,8} = 0,21$	$\frac{1/3}{2} = 0,17$	$\frac{5}{9,53} = 0,52$	$\frac{3}{16,5} = 0,18$	$\frac{3}{11,33} = 0,26$	0,28
Contaminación	$\frac{3}{4,8} = 0,62$	$\frac{1}{2} = 0,50$	$\frac{3}{9,53} = 0,31$	$\frac{7}{16,5} = 0,42$	$\frac{5}{11,33} = 0,44$	0,45
Valor del producto	$\frac{1/5}{4,8} = 0,04$	$\frac{1/3}{2} = 0,16$	$\frac{1}{9,53} = 0,10$	$\frac{5}{16,5} = 0,30$	$\frac{2}{11,33} = 0,18$	0,13
Pasos del proceso	$\frac{1/3}{4,8} = 0,07$	$\frac{1/7}{2} = 0,07$	$\frac{1/5}{9,53} = 0,02$	$\frac{1}{16,5} = 0,06$	$\frac{1/3}{11,33} = 0,03$	0,05
Capacidad instalada	$\frac{1/3}{4,8} = 0,07$	$\frac{1/5}{2} = 0,10$	$\frac{1/3}{9,53} = 0,03$	$\frac{1/2}{16,5} = 0,03$	$\frac{1}{11,33} = 0,09$	0,09

Nota. La tabla muestra Resultado de valorización de los criterios

ANEXO 2.

DESARROLLO DE LA VALORIZACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS RESPECTO A CADA CRITERIO

Para la evaluación de las alternativas se realizó el mismo proceso utilizado para el peso de los criterios donde:

1. Se evaluó la matriz de las alternativas para cada criterio con la escala de Satty
2. Se realizó la normalización de la matriz
3. Se suman las filas de la matriz normalizada para sacar los pesos de cada alternativa respecto al criterio evaluado en dicha matriz
4. Se realiza una multiplicación de matrices entre la matriz de alternativas respecto a cada criterio y entre los pesos obtenidos de las alternativas, esto se realiza con el fin de obtener un promedio ponderado del vector y así poderlo utilizar en la ecuación de IC.
5. Para determinar que la matriz evaluada tiene coherencia se utilizan las ecuaciones de IC, IA y RC, donde si la RC da menor a 0,1 se concluye que la matriz tiene coherencia.

Tabla 41

Criterio de energía evaluado para las alternativas

Energía	Pirólisis	Incineración	Gasificación	Glicólisis	Hidrólisis	Metanólisis
pirólisis	1	1/7	3	1/5	1/5	1/5
Incineración	7	1	5	3	5	5
Gasificación	1/3	1/5	1	1/7	1/5	1/5
Glicólisis	5	1/3	7	1	3	3
Hidrolisis	5	1/5	5	1/3	1	1/2
Metanólisis	5	1/5	5	1/3	2	1

Nota. La tabla muestra el Criterio de energía evaluado para las alternativas

Tabla 42.
Normalización matriz energía

	Pirólisis	Incineración	Gasificación	Glicólisis	Hidrolisis	Metanólisis	Peso
Pirólisis	0,04	0,08	0,06	0,03	0,02	0,02	0,04
Incineración	0,21	0,39	0,56	0,38	0,25	0,28	0,35
Gasificación	0,13	0,13	0,19	0,38	0,25	0,28	0,23
Glicólisis	0,21	0,13	0,06	0,13	0,25	0,28	0,18
Hidrolisis	0,21	0,13	0,06	0,04	0,08	0,05	0,10
Metanólisis	0,21	0,13	0,06	0,04	0,16	0,09	0,12

Nota. La tabla muestra la Normalización matriz energía

Tabla 43.
Criterio de contaminación evaluado para las alternativas

Contaminación	Pirólisis	Incineración	Gasificación	Glicólisis	Hidrolisis	Metanólisis
Pirólisis	1	1/3	1/3	1/5	1/3	1/5
Incineración	3	1	1/3	1/5	1/3	1/5
Gasificación	3	3	1	1/5	3	1/3
Glicólisis	5	5	5	1	5	3
Hidrolisis	3	3	1/3	1/5	1	1/3
Metanólisis	5	5	5	1/3	3	1

Nota. La tabla muestra la evaluación Criterio de contaminación para las alternativas

Tabla 44.
Normalización matriz contaminación

	Pirólisis	Incineración	Gasificación	Glicólisis	Hidrolisis	Metanólisis	Peso
Pirólisis	0,05	0,02	0,02	0,10	0,03	0,04	0,04
Incineración	0,15	0,06	0,02	0,10	0,03	0,041	0,07
Gasificación	0,15	0,17	0,06	0,07	0,03	0,04	0,09
Glicólisis	0,25	0,29	0,42	0,48	0,50	0,61	0,42
Hidrolisis	0,15	0,17	0,18	0,10	0,10	0,07	0,13
Metanólisis	0,25	0,29	0,30	0,16	0,30	0,20	0,25

Nota. La tabla muestra la Normalización matriz contaminación

Tabla 45.*Criterio de valor producto evaluado para las alternativas*

Valor Producto	Pirólisis	Incineración	Gasificación	Glicólisis	Hidrolisis	Metanólisis
Pirólisis	1	1/3	1/3	3	3	3
Incineración	3	1	1/3	3	3	3
Gasificación	3	3	1	5	5	5
Glicólisis	1/3	1/3	1/5	1	3	3
Hidrolisis	1/3	1/3	1/3	1/3	1	½
Metanólisis	1/3	1/3	1/3	1/3	2	1

Nota. La tabla muestra Criterio de valor producto evaluado para las alternativas**Tabla 46.***Normalización matriz valor del producto*

	Pirólisis	Incineración	Gasificación	Glicólisis	Hidrolisis	Metanólisis	Peso
Pirólisis	0,13	0,06	0,13	0,24	0,18	0,19	0,15
Incineración	0,38	0,19	0,13	0,24	0,18	0,19	0,22
Gasificación	0,38	0,56	0,40	0,39	0,29	0,32	0,39
Glicólisis	0,04	0,06	0,08	0,08	0,18	0,19	0,11
Hidrolisis	0,04	0,06	0,13	0,03	0,06	0,03	0,06
Metanólisis	0,04	0,06	0,13	0,03	0,12	0,06	0,07

Nota. La tabla muestra la Normalización matriz valor del producto**Tabla 47.***Criterio de aplicabilidad industrial evaluado para las alternativas*

Aplicabilidad	Pirólisis	Incineración	Gasificación	Glicólisis	Hidrolisis	Metanólisis
Pirólisis	1	1/3	1/3	5	7	5
Incineración	3	1	3	7	7	5
Gasificación	3	1/3	1	5	7	5
Glicólisis	1/5	1/7	1/5	1	5	1/3
Hidrolisis	1/7	1/7	1/7	1/5	1	1/5
Metanólisis	1/5	1/5	1/5	3	5	1

Nota. La tabla muestra la evaluación Criterio de aplicabilidad industrial para las alternativas

Tabla 48.
Normalización matriz aplicabilidad industrial

	Pirólisis	Incineración	Gasificación	Glicólisis	Hidrolisis	Metanólisis	Peso
Pirólisis	0,13	0,15	0,07	0,24	0,22	0,30	0,19
Incineración	0,40	0,46	0,62	0,33	0,22	0,30	0,39
Gasificación	0,40	0,15	0,21	0,24	0,22	0,30	0,25
Glicólisis	0,03	0,07	0,04	0,05	0,16	0,02	0,06
Hidrolisis	0,02	0,07	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03
Metanólisis	0,03	0,09	0,04	0,14	0,16	0,06	0,09

Nota. La tabla muestra la Normalización matriz aplicabilidad industrial

Tabla 49.
Criterio de pasos del proceso evaluado para las alternativas

Pasos del proceso	Pirólisis	Incineración	Gasificación	Glicólisis	Hidrolisis	Metanólisis
Pirólisis	1	3	1/3	3	3	3
Incineración	1/3	1	1/5	1/5	3	1/5
Gasificación	3	5	1	5	7	3
Glicólisis	1/3	5	1/5	1	3	1/3
Hidrolisis	1/3	1/3	1/7	1/5	1	1/5
Metanólisis	1/3	5	1/3	3	5	1

Nota. La tabla muestra la evaluación Criterio de pasos del proceso para las alternativas

Tabla 50.
Normalización matriz pasos del proceso

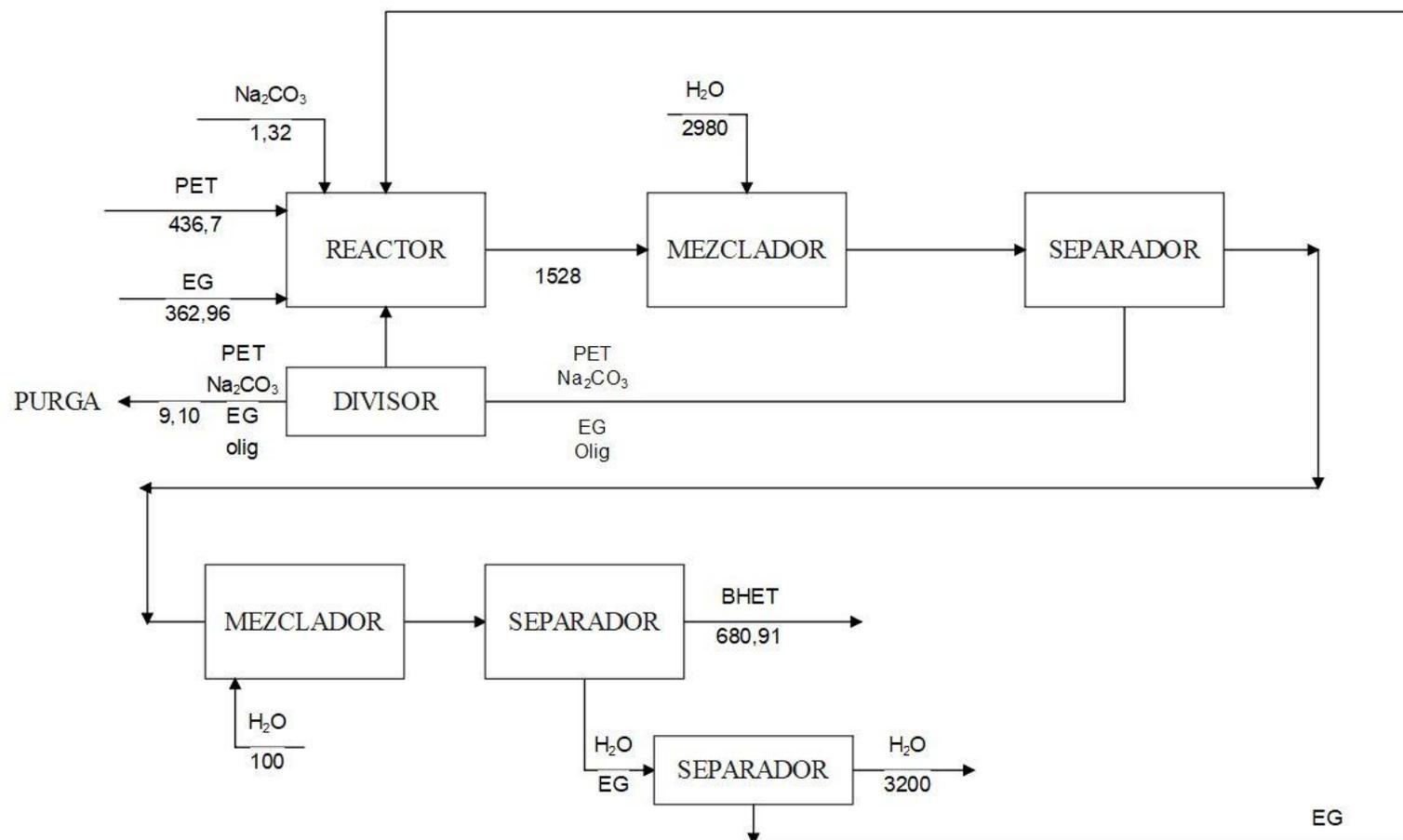
	Pirólisis	Incineración	Gasificación	Glicólisis	Hidrolisis	Metanólisis	Peso
Pirólisis	0,19	0,16	0,15	0,24	0,14	0,39	0,21
Incineración	0,06	0,05	0,09	0,02	0,14	0,02	0,06
Gasificación	0,56	0,26	0,45	0,40	0,32	0,39	0,40
Glicólisis	0,06	0,26	0,09	0,08	0,14	0,04	0,11
Hidrolisis	0,06	0,02	0,06	0,02	0,05	0,03	0,04
Metanólisis	0,06	0,26	0,15	0,24	0,23	0,13	0,18

Nota. La tabla muestra la Normalización matriz pasos del proceso

ANEXO 3.

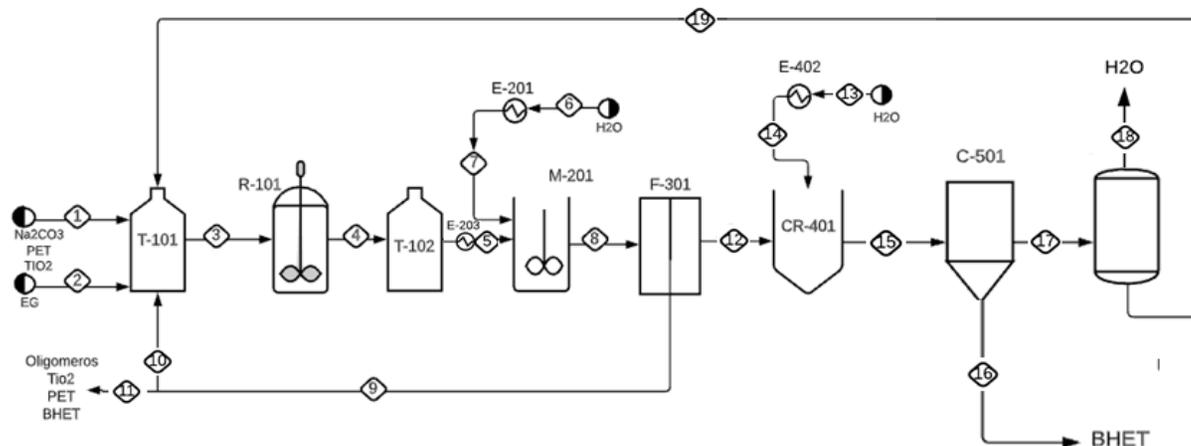
DIAGRAMA DE BLOQUE (BFD) Y DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO (PFD)

Diagrama de bloques (BFD)



Nota. Diagrama de bloques del proceso de glicolisis del PET. las cantidades están en kg/h

R-101	T-101	T-102	M-201	E-201	F-301	E-402	CR-401	C-501	D-601
Reactor de mezcla	Tanque de almacenamiento	Tanque de almacenamiento	Mezclador	Intercambiador de calor	Filtrador	Intercambiador de calor	Cristalizador	Centrifuga	Torre de destilación



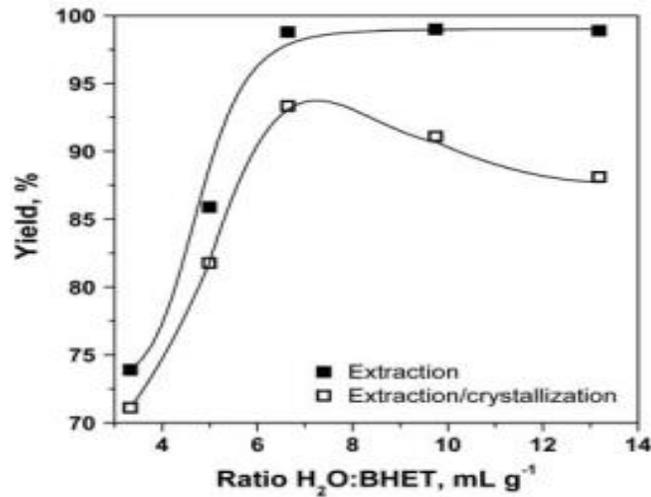
Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Temperatura °C	20	20	20	195	80	20	80	80	80	76	76	80	20	2	2	2	2	100	134
Presión atm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo (Kg/h)	446	362	1528	1528	1528	2980	2980	4508	18,21	9,1	9,1	4490	100	100	4590	680	3909	3200	709
PET	436	0	436	0,11	0,11	0	0	0,11	9,7*10 ⁻⁷	0,04	0,04	0,01	0	0	0,01	0,01	0	0	0
Etilenglicol	0	362	1038	897	897	0	0	897	0,33	0,16	0,16	897	0	0	897	22,8	874	199	675
Colorante	8,73	0	15,88	15,88	15,88	0	0	15,88	14,29	7,1	7,1	1,58	0	0	1,58	1,58	0	0	0
BHET (L)	0	0	33,8	600	600	0	0	600	0,22	0,11	0,11	600	0	0	33,33	0,59	32,74	0	32,
BHET (S)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	567	567	0	0	0
Agua	0	0	11,5	11,57	11,57	2980	2980	2991	1,10	0,5	0,5	2990	100	100	3090	78,6	3012	3001	11
Na ₂ CO ₃	1,32	0	2,41	2,41	2,41	0	0	2,41	2,16	1,1	1,1	0,25	0	0	0,24	0,24	0	0	0

ANEXO 4.

REPRESENTACIONES GRAFICAS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL PROCESO DE GLICÓLISIS

Figura 27.

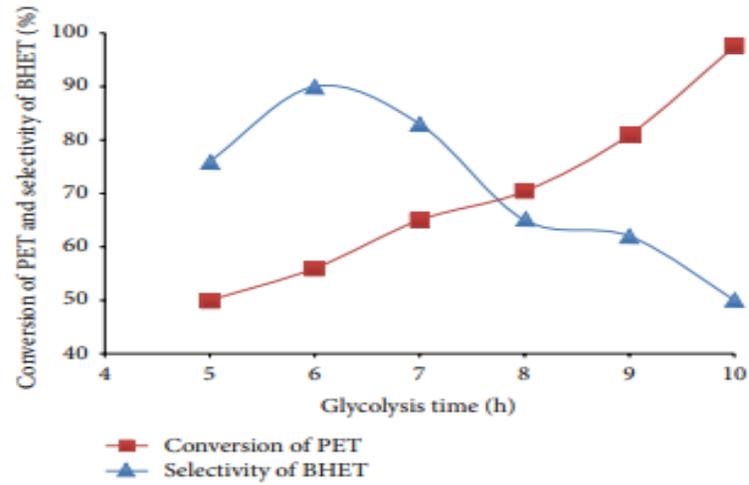
Cantidad de agua utilizada para extracción y cristalización



Nota. Muestra la cantidad de agua que se necesita para la extracción y cristalización. Tomado de: I. Duque-Ingunza, R. López-Fonseca, B. de Rivas, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, “Process optimization for catalytic glycolysis of post-consumer PET wastes,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 89, no. 1, pp. 97–103, 2014, doi: 10.1002/jctb.4101. [Acceso: marzo 12, 2021].

Figura 28.

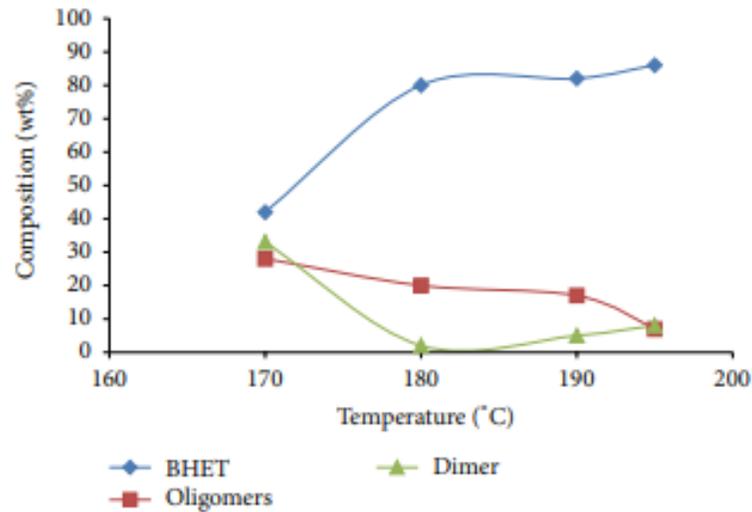
Conversión del PET a través del tiempo



Nota. Esta grafica muestra la conversión del PET y la selectividad del BHET al transcurrir el tiempo. Tomado de: I. Duque-Ingunza, R. López-Fonseca, B. de Rivas, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, "Process optimization for catalytic glycolysis of post-consumer PET wastes," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 89, no. 1, pp. 97–103, 2014, doi: 10.1002/jctb.4101. [Acceso: marzo 12, 2021].

Figura 29.

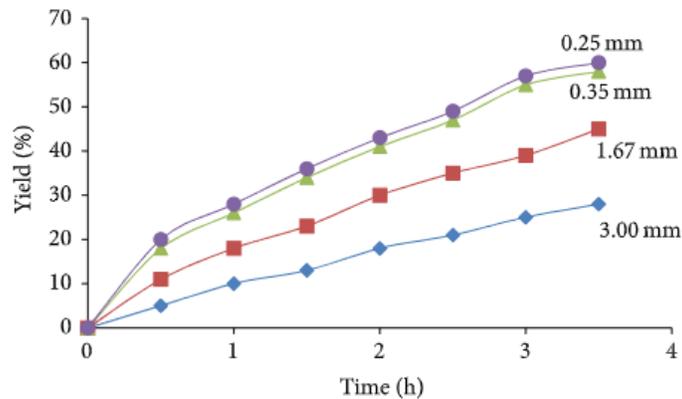
Porcentaje de Peso del BHET al aumentar temperatura



Nota. Esta grafica muestra como disminuye los oligómeros y dímeros y como aumenta el BHET. Tomado de: I. Duque-Ingunza, R. López-Fonseca, B. de Rivas, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, “Process optimization for catalytic glycolysis of post-consumer PET wastes,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 89, no. 1, pp. 97–103, 2014, doi: 10.1002/jctb.4101. [Acceso: marzo 12, 2021].

Figura 30.

Porcentaje de rendimiento del BHET para diferentes tamaños de partícula



Nota. Esta grafica muestra como al disminuir el tamaño de partícula del PET se aumenta el rendimiento. Tomado de: I. Duque-Ingunza, R. López-Fonseca, B. de Rivas, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, “Process optimization for catalytic glycolysis of post-consumer PET wastes,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 89, no. 1, pp. 97–103, 2014, doi: 10.1002/jctb.4101. [Acceso: marzo 12, 2021].

ANEXO 5.

ILUSTRACIONES DE LAS ESPECIFICACIONES DADAS EN ASPEN PLUS PARA LA SIMULACIÓN DE LA GLICÓLISIS DEL PET

Figura 31.

Componentes ingresados al simulador ASPEN PLUS.

The screenshot displays the 'Components' selection interface in Aspen Plus. The window title is 'BINRY-1 (BINARY) - Input'. The 'Selection' tab is active, showing a list of components. The 'Analysis' tree on the left indicates the current process is 'BINRY-1'.

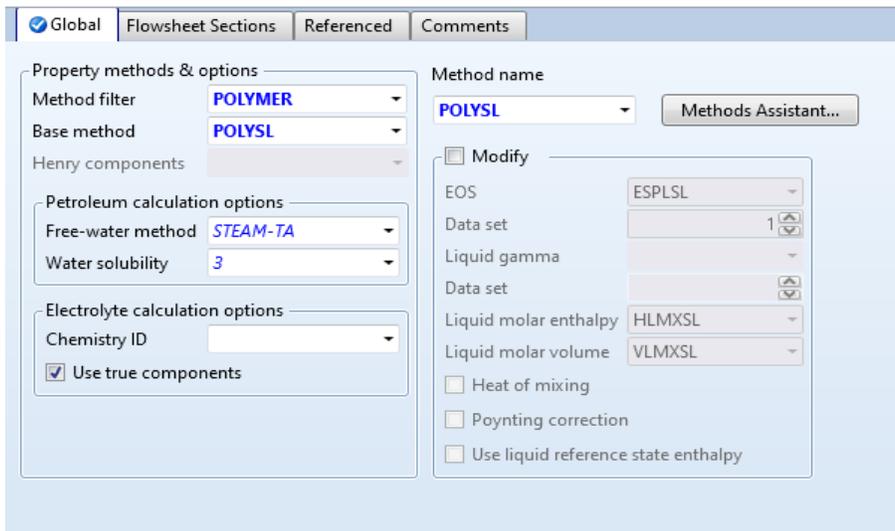
Component ID	Type	Component name	Alias
PET	Solid	POLY(ETHYLENE-TEREPHTHAL...	PET
ETHYL-01	Conventional	ETHYLENE-GLYCOL	C2H6O2
C12H14O6	Conventional	BIS-2-HYDROXYETHYL-TEREP...	C12H14O6
TIO2	Solid	TITANIUM-DIOXIDE-RUTILE	TIO2
NA2CO3	Solid	SODIUM-CARBONATE	NA2CO3
BIS-2-01	Solid	BIS-2-HYDROXYETHYL-TEREP...	C12H14O6
H2O	Conventional	WATER	H2O

Buttons at the bottom: Find, Elec Wizard, SFE Assistant, User Defined, Reorder, Review.

Nota. Esta figura muestra las especificaciones de cada compuesto que está involucrado en el proceso de glicólisis.

Figura 32.

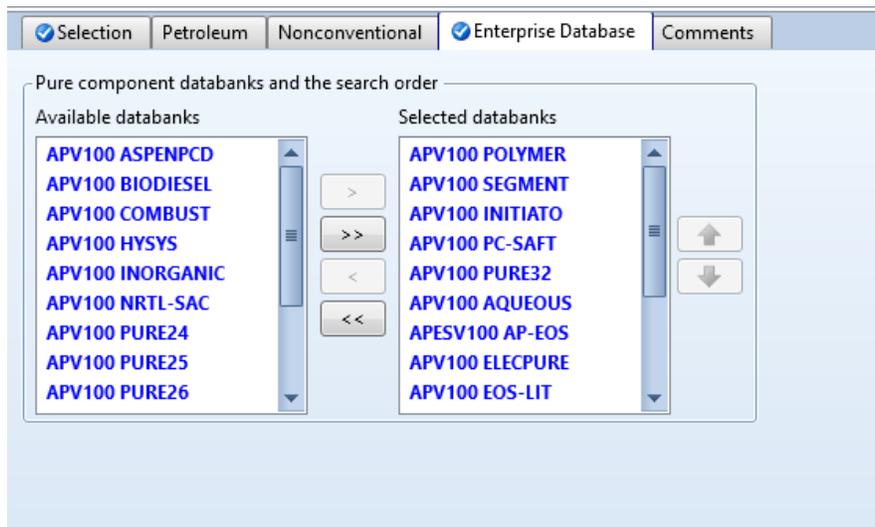
Modelo termodinámico utilizado en ASPEN PLUS



Nota. Esta figura muestra el modelo termodinámico utilizado.

Figura 33.

Bases de datos utilizadas en ASPEN PLUS.



Nota. Esta figura muestra las bases datos que se utilizaron

ANEXO 6.

DATOS CINÉTICOS TOMADOS DE UN ARTÍCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN Y LA ENTALPÍA DE REACCIÓN

Tabla 51.

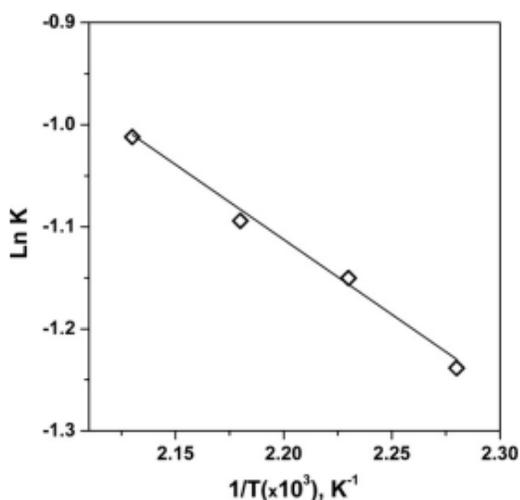
Datos cinéticos para la glicólisis del PET con carbonato de sodio

Temperature (°C)	K (L mol ⁻¹)	k ₁ ' (h ⁻¹) PET:catalyst molar ratio			k ₁ (L ² mol ⁻² h ⁻¹)	k ₂ (L mol ⁻¹ h ⁻¹)
		400:1	200:1	100:1		
165	0.29	0.030 ± 0.001	0.059 ± 0.003	2.893 ± 0.007	0.122 ± 0.003	0.839 ± 0.007
175	0.32	0.065 ± 0.003	0.214 ± 0.004	7.309 ± 0.632	0.302 ± 0.015	2.339 ± 0.632
185	0.33	0.217 ± 0.003	0.592 ± 0.014	20.664 ± 1.401	0.840 ± 0.028	6.819 ± 1.401
196	0.36	0.858 ± 0.057	1.568 ± 0.168	67.208 ± 2.006	3.767 ± 0.361	24.195 ± 2.006

Nota. Estos datos muestran los parámetros cinéticos. Tomado de: R. López-Fonseca, I. Duque-Ingunza, B. de Rivas, L. Flores-Giraldo, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, “Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate,” *Chem. Eng. J.*, vol. 168, no. 1, pp. 312–320, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.01.031. [Acceso: marzo 8, 2021].

Figura 34.

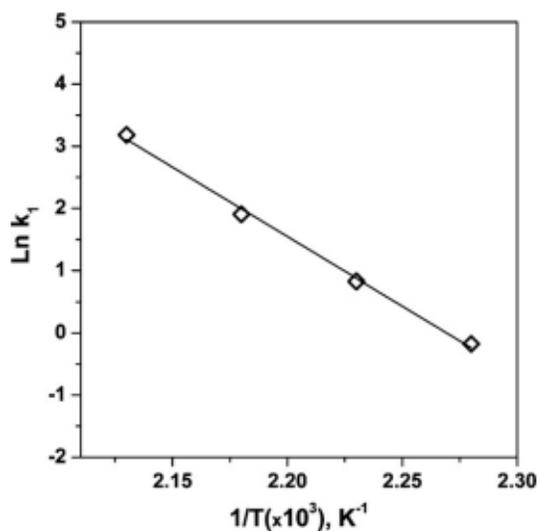
Relación de la ecuación de van't hoff con la constante de equilibrio.



Nota. Esta grafica muestra que la reacción es endotérmica. Tomada de: R. López-Fonseca, I. Duque-Ingunza, B. de Rivas, L. Flores-Giraldo, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, “Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate,” *Chem. Eng. J.*, vol. 168, no. 1, pp. 312–320, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.01.031. [Acceso: marzo 8, 2021].

Figura 35.

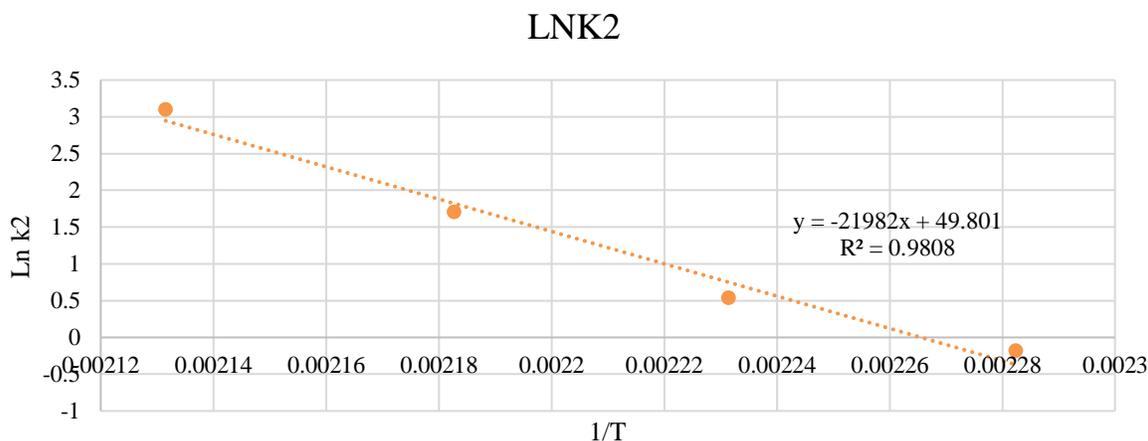
La ecuación de Arrhenius con la constante de la reacción directa.



Nota. esta grafica muestra la energía de activación. Tomada de: R. López-Fonseca, I. Duque-Ingunza, B. de Rivas, L. Flores-Giraldo, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, “Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate,” *Chem. Eng. J.*, vol. 168, no. 1, pp. 312–320, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.01.031. [Acceso: marzo 8, 2021].

Figura 36.

La ecuación de Arrhenius con la constante de la reacción inversa.



Nota. esta grafica fue realizada por los investigadores de este trabajo, se realizó esta regresión lineal con el fin de determinar la energía de activación de la reacción inversa.

ANEXO 7.

ECUACIONES Y GRAFICAS DE LA CINETICA DE LA REACCION DE glicólisis DEL PET

Ecuación 12.

Velocidad de despolimerización del PET

$$-\frac{dC_{\text{PET}}}{dt} = k_1 C_{\text{PET}}^a C_{\text{EG}}^b C_{\text{CAT}}^c - k_2 C_{\text{CAT}}^c C_{\text{BHET}}^d$$

Empleando la tabla estequiométrica en términos de conversión se obtuvieron las expresiones de concentración de las especies involucradas (PET y BHET), las expresiones en términos de conversión esto se puede observar en la ecuación 9 y 10.

Ecuación 13.

Expresiones de concentración obtenidas de tabla estequiometria

$$C_{\text{PET}} = C_{\text{PET},0}(1 - X)$$

$$C_{\text{BHET}} = C_{\text{BHET},0} + C_{\text{PET},0}X$$

Ecuación 14.

Expresión Cinética en términos de conversión

$$\frac{dX}{dt} = \frac{k'_1}{X_e}(X_e - X)$$

La ecuación (10) muestra la cinética en términos de conversión, esta es integrada y utilizada para determinar las constantes de velocidad de la reacción en diferentes tiempos y conversiones por medio de una regresión lineal.

Ecuación 15.

Expresión Cinética integrada en términos de conversión

$$-\ln\left(1 - \frac{X}{X_e}\right) = \frac{k'_1}{X_e}t$$

La ecuación (10) muestra la cinética en términos de conversión, esta es integrada y utilizada para determinar las constantes de velocidad de la reacción en diferentes tiempos y conversiones por medio de una regresión lineal.

La constante de equilibrio de la reacción de glycolysis esta expresada en términos de la conversión en equilibrio del PET de la siguiente manera.

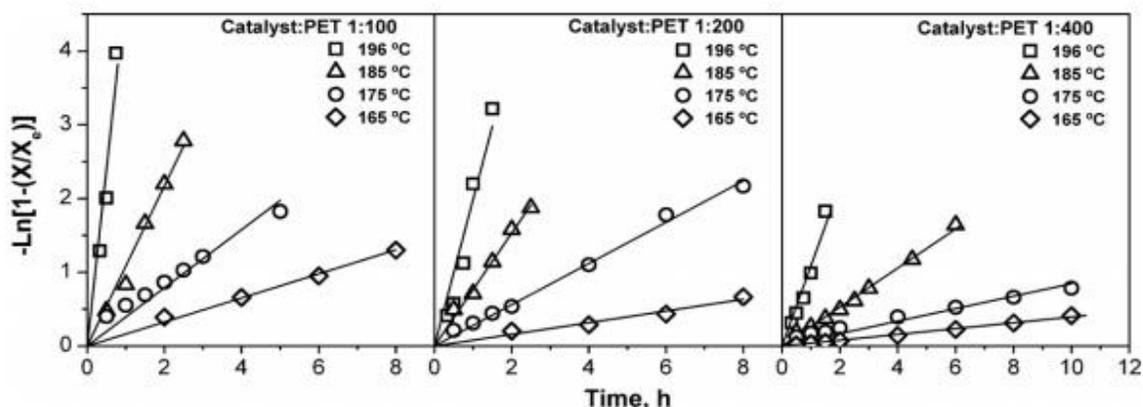
Ecuación 16.

Velocidad de despolimerización del PET

$$K = \frac{k_1}{k_2} = \frac{X_e}{C_{EG,0}(1 - X_e)}$$

Figura 37.

Constantes de velocidad para diferentes cantidades de catalizador y PET con diferentes temperaturas



Nota. Esta figura muestra las especificaciones de cada compuesto que esta involucrado en proceso de glicólisis. Tomado de: R. López-Fonseca, I. Duque-Ingunza, B. de Rivas, L. Flores-Giraldo, and J. I. Gutiérrez-Ortiz, “Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate,” *Chem. Eng. J.*, vol. 168, no. 1, pp. 312–320, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.01.031. [Acceso: marzo 8, 2021].

ANEXO 8.

ILUSTRACIONES DE LAS DIMENSIONES ESPECIFICACIONES EN ASPEN PLUS PARA EL REACTOR BATCH

Figura 38.

Datos cinéticos de la reacción directa para la simulación del reactor en Aspen plus

The screenshot shows the Aspen Plus interface for defining kinetic data for a reaction. The reaction is: 1) PET(MIXED) + ETHYL-01 --> C12H14O6(MIXED). The reacting phase is set to 'Liquid' and the rate basis is 'Cat (wt)'. The 'Power Law kinetic expression' section is active, showing the following parameters:

Parameter	Value	Units
k	1,721e+22	
n	0	
E	1,87e+08	J/kmol
To		C
[Ci] basis	Molarity	

Buttons for 'Edit Reactions' and 'Solids' are visible on the right side of the window.

Nota: Esta figura muestra la reaccion directa, donde se utiliza un modelo matematico POWER LAW.

Figura 39. Datos cinéticos de la reacción inversa para la simulación del reactor en Aspen plus

The screenshot shows the Aspen Plus interface for defining kinetic data for an inverse reaction. The reaction is: 2) C12H14O6 --> PET(MIXED) + ETHYL-01(MIXED). The reacting phase is set to 'Liquid' and the rate basis is 'Cat (wt)'. The 'Power Law kinetic expression' section is active, showing the following parameters:

Parameter	Value	Units
k	4,249e+21	
n	0	
E	1,8275e+08	J/kmol
To		C
[Ci] basis	Molarity	

Buttons for 'Edit Reactions' and 'Solids' are visible on the right side of the window.

Nota. Esta figura muestra la reaccion inversa, donde se utiliza un modelo matematico POWER LAW

Figura 40. Condiciones de operación de la reacción.

Specifications Kinetics Stop Criteria Operation Times Continuous Feeds Controllers PSD Comments

Reactor operating specification
Constant temperature
Temperature 195 C

Pressure specification
Specify reactor pressure
Reactor pressure 0,986923 atm
Catalyst loading 10,83 kg

Valid phases
Reactor Liquid-Only
Vent accumulator Vapor-Only 2nd Liquid

Nota. Esta figura muestra las condiciones de operación del proceso reactivo

Figura 41. Tiempo de operación de la reacción.

Specifications Kinetics Stop Criteria Operation Times Continuous Feeds Controllers PSD Cor

Batch cycle time
 Total cycle time 2,5 hr
 Batch feed time hr
Down time 0 hr

Profile result time
Maximum calculation time 3 hr
Time interval between profile points 0,5 hr
Maximum number of profile points 8

Nota. Esta figura muestra las condiciones de operación del proceso reactivo.

Figura 42.

Dimensiones del reactor.

Liquid volume [l]	8170,47	
Vessel diameter [meter]	1,5136	
Vessel tangent to tangent height [meter]	4,5408	
Design gauge pressure [barg]	1,03	
Liquid volume	8.1705	M3
Shell material	A285C	
Diameter option	ID	
Vessel diameter	1.5136	M
Vessel tangent to tangent height	4.5408	M
Impeller speed	525.000	RPM
Agitator power	30.000	KW
Driver type	STD	

Nota. Esta figura muestra las dimensiones como volumen, altura y diametro del reactor.

ANEXO 9.

ILUSTRACIONES DE LAS DIMENSIONES Y ESPECIFICACIONES EN ASPEN PLUS PARA LOS INTERCAMBIADORES

- INTTERCAMBIADOR E-203

Figura 43.

Dimensiones del intercambiador de calor E-203

<input checked="" type="checkbox"/> Geometry <input checked="" type="checkbox"/> Process <input checked="" type="checkbox"/> Errors & Warnings <input checked="" type="checkbox"/> Run Status			
Configuration			
TEMA Type	B -	E -	M -
Tube layout option	New (optimum) layout		
Location of hot fluid	Shell side		
Tube OD / Pitch	in	0,75	0,9375
Tube pattern	30-Triangular		
Tubes are in baffle window	Yes		
Baffle type	Single segmental		
Baffle cut orientation	Horizontal		
Default exchanger material	Carbon Steel		
Shell ID / OD	in	8,071	8,625
Tube length	in	64,9606	
Baffle spacing center-center	in	3,937	
Number of baffles	14		
Number of tube / passes		48	2
Shells in series	1		
Shells in parallel	1		
Overall Results			
Excess surface (%)	3		
Dp-ratio Shellside / Tubeside	0,1966 / 0,7649		
Total cost (all shells)	Dollar(US)	9675	

Nota. Esta figura muestra las dimensiones basicas del Intercambiador que arajo el programa APEN PLUS.

Figura 44.

Requerimientos del intercambiador de calor E-203

Summary		Balance	Exchanger Details	Pres Drop/Velocities	Zones	Utility Usage	Status
Calculation Model: Rigorous - Shell&Tube							
		Inlet			Outlet		
Hot stream:	2HEATX			3C			
Temperature	195	C		80	C		
Pressure	100000	N/sqm		98034,3	N/sqm		
Vapor fraction	0			0			
1st liquid / Total liquid	1			1			
Cold stream	U-3			U-3			
Temperature	20	C		25	C		
Pressure	101325	N/sqm		101325	N/sqm		
Calculated heat duty				159852	Watt		
Required exchanger area				4,3707	sqm		
Actual exchanger area				4,51856	sqm		
Percent over (under) design				3,38304			
Average U (Dirty)				328,451	Watt/sqm-K		
Average U (Clean)				696,669	Watt/sqm-K		
UA				1435,56	J/sec-K		
LMTD (Corrected)				111,352	C		
LMTD correction factor				1,05426			

Nota. Esta figura muestra las dimensiones basicas del Intercambiador que arrojó el programa APEN PLUS

• INTERCAMBIADOR E-201

Figura 45.
Especificaciones ingresadas del Intercambiador de calor E-201

Specifications Streams LMTD Pressure Drop U Methods Film Coefficients Utilities

Shortcut
 Detailed
 Shell & Tube
 Kettle Reboiler
 Thermosyphon
 Air Cooled
 Plate

Shell
 Tube

Countercurrent
 Cocurrent
 Multipass, calculate number of shells
 Multipass, shells in series: 1

Calculation mode: Rating

Select utility for this block:
 Hot utility: U-9
 Cold utility:
 Utility to drive fan:

Exchanger specification:
 Specification: Cold stream outlet temperature
 Value: 80 C

Selected calculation method:
 Constant U value: 0,0203019 cal/sec-sqcm-K
 Phase specific values
 Power law for flow rate
 Exchanger geometry
 Film coefficients
 User subroutine

Scaling factor:
 U correction factor: 1

Phase specific values		
Hot side	Cold side	U value
		cal/sec-sq
Liquid	Liquid	0,0203019
Liquid	Boiling	0,0203019
Liquid	Vapor	0,0203019
Condensing	Liquid	0,0203019
Condensing	Boiling	0,0203019
Condensing	Vapor	0,0203019

Nota. Esta figura muestra las especificaciones ingresadas al Intercambiador de calor.

Figura 46.

Dimensiones del intercambiador de calor E-201

✓ Geometry		✓ Process		✓ Errors & Warnings		✓ Run Status	
TEMA Type	B -	E -	M -	BEM			
Tube layout option	New (optimum) layout			New (optimum) layout			
Location of hot fluid	Shell side			Shell side			
Tube OD / Pitch	m	0,019	/	0,0238	0,019	/	0,0238
Tube pattern	30-Triangular			30			
Tubes are in baffle window	Yes			Yes			
Baffle type	Single segmental			Single segmental			
Baffle cut orientation	Horizontal			H			
Default exchanger material	Carbon Steel			Carbon Steel			
Shell ID / OD	m	0,205	/	0,2191	0,205	/	0,2191
Tube length	m	1,2		1,2			
Baffle spacing center-center	m	0,135		0,135			
Number of baffles	6			6			
Number of tube / passes	32		/	4	32	/	4
Shells in series	1			1			
Shells in parallel	1			1			
Overall Results							
Excess surface (%)				5			
Dp-ratio Shellside / Tubeside					0,0525	/	0,6642
Total cost (all shells)	Dollar(US)			8861			

Nota. Esta figura muestra las dimensiones básicas del Intercambiador que arrojó el programa APEN PLUS.

Figura 47.

Dimensiones del intercambiador de calor E-201

Calculation Model		Rigorous - Shell&Tube			
		Inlet		Outlet	
Hot stream:	U-9		U-9		
Temperature	175	C	174	C	
Pressure	892540	N/sqm	871696	N/sqm	
Vapor fraction	1		0		
1st liquid / Total liquid			1		
Cold stream	4HEATX		4HOT		
Temperature	20	C	80	C	
Pressure	101325	N/sqm	88041,2	N/sqm	
Calculated heat duty	102333 Watt				
Required exchanger area	2,04043 sqm				
Actual exchanger area	2,15058 sqm				
Percent over (under) design	5,39818				
Average U (Dirty)	411,907 Watt/sqm-K				
Average U (Clean)	2402,44 Watt/sqm-K				
UA	840,467 J/sec-K				
LMTD (Corrected)	121,757 C				
LMTD correction factor	0,996922				

Nota. Esta figura muestra las dimensiones básicas del Intercambiador que arrojo el programa APEN PLUS.

• INTERCAMBIADOR E-402

Figura 48.

Especificaciones ingresadas del Intercambiador de calor E-402

Shortcut
 Detailed
 Shell & Tube
 Kettle Reboiler
 Thermosyphon
 Air Cooled
 Plate

Shell
 Tube

Countercurrent
 Cocurrent
 Multipass, calculate number of shells
 Multipass, shells in series

Calculation mode: **Rating**

Exchanger specification

Specification: **Hot stream outlet temperature**

Value: **C**

Selected calculation method

Constant U value
 Phase specific values
 Power law for flow rate
 Exchanger geometry
 Film coefficients
 User subroutine

Scaling factor

U correction factor:

	Hot side	Cold side	U value
			cal/sec-sqm-K
>	Liquid	Liquid	0,0203019
>	Liquid	Boiling	0,0203019
>	Liquid	Vapor	0,0203019
>	Condensing	Liquid	0,0203019
>	Condensing	Boiling	0,0203019
>	Condensing	Vapor	0,0203019

Nota. Esta figura muestra las especificaciones ingresadas al Intercambiador de calor.

Figura 49.

Dimensiones del intercambiador de calor E-402

TEMA Type	B -	E -	M -	BEM
Tube layout option	New (optimum) layout			
Location of hot fluid	Shell side			Shell side
Tube OD / Pitch	m	0,019	/	0,0238
Tube pattern	30-Triangular			30
Tubes are in baffle window	Yes			Yes
Baffle type	Single segmental			Single segmental
Baffle cut orientation	Horizontal			H
Default exchanger material	Carbon Steel			Carbon Steel
Shell ID / OD	m	0,205	/	0,2191
Tube length	m	1,2		
Baffle spacing center-center	m	0,135		
Number of baffles	6			6
Number of tube / passes		30	/	6
Shells in series	1			1
Shells in parallel	1			1
Overall Results				
Excess surface (%)				783
Dp-ratio Shellside / Tubeside				0,0121 / 0,0137
Total cost (all shells)	Dollar(US)			8779

Nota. Esta figura muestra las dimensiones básicas del Intercambiador que arrojó el programa APEN PLUS.

Figura 50.

Dimensiones del intercambiador de calor E-402

Calculation Model		Rigorous - Shell&Tube	
		Inlet	Outlet
Hot stream:	8HEATX	8HXC	
Temperature	20 C	2 C	
Pressure	101325 N/sqm	101192 N/sqm	
Vapor fraction	0	0	
1st liquid / Total liquid	1	1	
Cold stream	UTILITY	UOUT	
Temperature	-40 C	-29,1275 C	
Pressure	101325 N/sqm	101050 N/sqm	
Calculated heat duty	1150,63 Watt		
Required exchanger area	0,228422 sqm		
Actual exchanger area	2,01617 sqm		
Percent over (under) design	782,651		
Average U (Dirty)	113,935 Watt/sqm-K		
Average U (Clean)	147,809 Watt/sqm-K		
UA	26,0251 J/sec-K		
LMTD (Corrected)	44,2124 C		
LMTD correction factor	0,972272		

Nota. Esta figura muestra las dimensiones básicas del Intercambiador que arrojo el programa APEN PLUS.

Figura 51.

Requerimientos cumplidos de los intercambiadores en el módulo EDR

Enabled by Aspen EDR Design and Rating (EDR)									
Exchanger Name	Hierarchy Block	Model Status	Summary 3 OK	Pressure	Temperature	Vibration	Erosion: RhoV2	Heat Transfer	Pressure l
HX-101		Revert to Simple	●	●	●	●	●	●	●
HX-201		Revert to Simple	●	●	●	●	●	●	●
HX-301		Revert to Simple	●	●	●	●	●	●	●

Nota. Esta figura muestra que los intercambiadores que se ajustaron geometrica y termicammte en aspen cumplen con los requerimientos.

ANEXO 10.

ILUSTRACIONES DE LAS DIMENSIONES Y ESPECIFICACIONES EN ASPEN PLUS PARA EL MEZCLADOR

Tabla 52. Relaciones típicas para el diseño de un agitador

$\frac{Da}{Dt} = \frac{1}{3}$	$\frac{E}{Da} = 1$	$\frac{H}{Dt} = 1$
-------------------------------	--------------------	--------------------

Nota. Estas relaciones fueron tomadas del libro W. McCabe, *Operaciones unitarias en ingeniería química*, Séptima ed. Ciudad de México, 2012.

Donde:

Da: Diámetro del agitador

Dt: Diámetro del tanque

E: Distancia del eje del agitador al fondo del tanque

H: Altura del agitador

Figura 52.

Especificaciones ingresadas al mezclador M-201

The screenshot shows the Aspen Plus software interface for the mixer specifications of M-201. The window title is "1F (MATERIAL) - Results (Default) x R-101 (RBatch) x Main Flowsheet x Results Summary - Equ". The "Flash Options" tab is selected. The "Mixer specifications" section includes "Pressure" set to "1 atm" and "Valid phases" set to "Liquid-Only". The "Temperature estimate" section shows the unit set to "K". The "Convergence parameters" section shows "Maximum iterations" set to "30" and "Error tolerance" set to "0,0001".

Nota. Esta figura muestra las especificaciones ingresadas al mezclador.

Figura 53.

Dimensiones del mezclador

Item type	MIXER		
Number of identical items	1		
EQUIPMENT DESIGN DATA			
Application	CONT		
Liquid volume	2.7276	M3	
Shell material	A285C		Liquid volume [l] 2727,6
Diameter option	ID		Vessel diameter [meter] 1,05
Vessel diameter	1.0500	M	Vessel tangent to tangent height [meter] 3,15
Vessel tangent to tangent height	3.1500	M	Design gauge pressure [barg] 1,03
Impeller type	MP3B2		
Impeller diameter	0.277091	M	
Impeller speed	822.000	RPM	
Agitator power	15.000	KW	
Driver type	STD		

Nota. Esta figura muestra las dimensiones básicas del mezclador que arrojo el programa ASPEN PLUS.

ANEXO 11.

ILUSTRACIONES DE LAS DIMENSIONES Y ESPECIFICACIONES EN ASPEN PLUS PARA EL FILTRO

Figura 54.

Especificaciones ingresadas del filtro F-301

The screenshot shows the Aspen Plus interface for the 'F-301 (Filter)' unit. The 'Specifications' tab is selected, showing the following settings:

- Calculation options:**
 - Model: Solids separator
 - Mode: Simulation
 - Filtration model: Alles
- Separation:**
 - Specify phase separation: Solid load of liquid outlet
 - Fraction of solids to solid outlet: 0,1
 - Fraction of liquid to liquid outlet: (empty field)
 - Liquid load of solid outlet: (empty field)
 - Solid load of liquid outlet: 0,1
 - Classification characteristic: Particle size
 - Separation sharpness: 0
 - Offset of fines: 0

Nota. Esta figura muestra las especificaciones ingresadas al filtro F-301.

Figura 55.

Dimensiones del Filtro F-301

EQUIPMENT DESIGN DATA		
Disk diameter	1.5240	M
Number of disks	3	
Surface area	9.2903	M2
Material	A285C	
PROCESS DATA		
Liquid flow rate	5.8764	L/S
Solid flow rate	0.018381	TONNE/H
Solids handling rate	0.122067	TPH/M2
Consistency Air Dried	15.000	PERCENT
Tank or vat material	NONE	
Application	MD RATE	
Driver speed	1800.000	RPM
Driver power	2.2200	KW

Solid flow rate [kg/hr]	18,381
Surface area [sqm]	9,29034
Solids handling rate	
Disk diameter [meter]	1,524
Number of disks	3
Filter vat length [meter]	
Liquid flow rate [l/min]	362,46

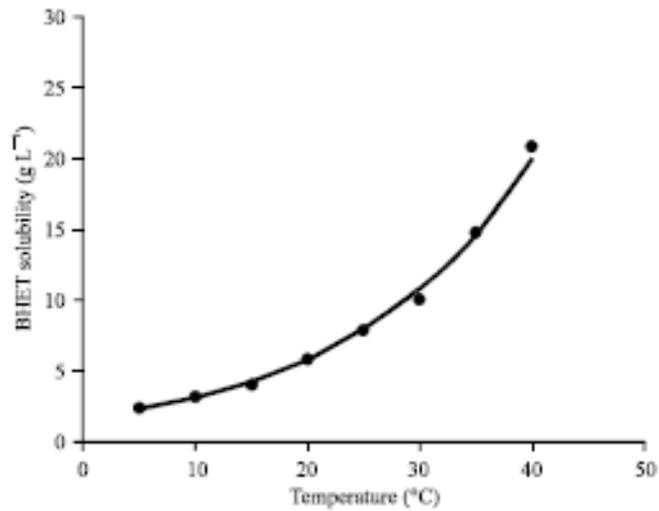
Nota. Esta figura muestra las dimensiones básicas del Filtro F-301 que arrojo el programa APEN PLUS.

ANEXO 12.

ESPECIFICACIONES Y DIMENSIONAMIENTO EN ASPEN PLUS DEL CRISTALIZADOR

Figura 56.

Gráfica de solubilidad BHET/H₂O



Nota. esta figura presenta el comportamiento de solubilidad del BHET en agua en función de la temperatura. Tomado de: H. . Goh, A. Salmiaton, N. Abdullah, and A. Idris, "Process Simulation of Two-stage Evaporation and Crystallization Systems for Bis(2-hydroxyethyl) terephthalate Recovery," *J. Appl. Sci.*, vol. 1, p. 10, 2012.

Figura 57.

Especificaciones de entrada ingresadas en el bloque “Crystallizer”

The image shows two screenshots of a software interface for a Crystallizer. The top screenshot displays the 'Specifications' tab with the following settings:

- Operating conditions:** Temperature: 2 C, Pressure: 1 atm.
- Saturation calculation method:** Solubility data (selected), Solubility function, Chemistry, User subroutine.
- Salt specifications:** Salt component ID (empty), Move crystallizing salt from CI Solids substream (checked), Move crystallized salt to CI Solids substream (checked).
- Valid phases:** Liquid-Only.
- Operating mode:** Crystallizing.

The bottom screenshot displays the 'Solubility' tab with the following settings:

- Solubility basis:** Solvent (selected), H2O.
- Solubility data:** Solubility data type: Concentration.
- Solubility data table:**

Temperature	Concentration
C	gm/l
5	2,5
10	3,7
15	4
20	5,2
25	7,5
30	10
35	15
40	21

Nota: Esta figura muestra las especificaciones ingresadas al Cristalizador CR-501.

Figura 58.

Dimensionamiento obtenido del cristalizador CR-501

Name	ECRYBATCH VAC
User tag number	C-301
Remarks 1	Equipment mapped
Quoted cost per item [EUR]	
Currency unit for matl cost	
Number of identical items	1
Installation option	
Material	
Liquid volume [l]	3256,46

Nota. Esta figura muestra el dimensionamiento obtenido del Cristalizador CR-501 empleando el modulo aspen economics de Aspen Plus V9.

ANEXO 13.

ESPECIFICACIONES Y DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO D-601

Figura 59.

Especificaciones de entrada equipo D-601 (bloque DSTWU)

The screenshot shows a software interface with four tabs: Specifications (selected), Calculation Options, Convergence, and Information. The Specifications tab is active and contains the following settings:

- Column specifications:**
 - Number of stages: 20
 - Reflux ratio: (empty)
- Pressure:**
 - Condenser: 1 atm
 - Reboiler: 1 atm
- Key component recoveries:**
 - Light key:**
 - Comp: H2O
 - Recov: 0,9
 - Heavy key:**
 - Comp: ETHYL-01
 - Recov: 0,1
- Condenser specifications:**
 - Total condenser
 - Partial condenser with all vapor distillate
 - Partial condenser with vapor and liquid distillate
 - Distillate vapor fraction: 0

Nota: Datos de entrada para la simulación del equipo D-601 (DSTWU)

Figura 60.

Resultados especificaciones de diseño equipo D-601 (bloque DSTWU)

DSTWU	
Number of stages	20
Reflux ratio	
Light key component recovery	0,9
Heavy key component recovery	0,1
Distillate vapor fraction	0
Minimum reflux ratio	0,12042
Actual reflux ratio	0,131331
Minimum number of stages	1,3925
Number of actual stage	20
Feed stage	18,6737
Number of actual stage above feed	17,6737
Distillate temperature [K]	375,926
Distillate to feed fraction [K]	436,916
Total feed stream CO2e flow [kg/hr]	0
Total product stream CO2e flow [kg/hr]	0

Nota. La figura muestra los resultados de la simulación y especificaciones de diseño del equipo D-601

Figura 61.

Especificaciones de entrada equipo D-601 (bloque RAD-FRAC)

Configuration
 Streams
 Pressure
 Condenser
 Reboiler
 3-Phase
 Information

Setup options

Calculation type: *Equilibrium*
 Number of stages: **20**
 Condenser: **Total**
 Reboiler: *Kettle*
 Valid phases: *Vapor-Liquid*
 Convergence: **Strongly non-ideal liquid**

Operating specifications

Distillate rate: **Mass** **1653,76** **kg/hr**
 Reflux ratio: **Mass** **0,120888**
 Free water reflux ratio:

Feed streams

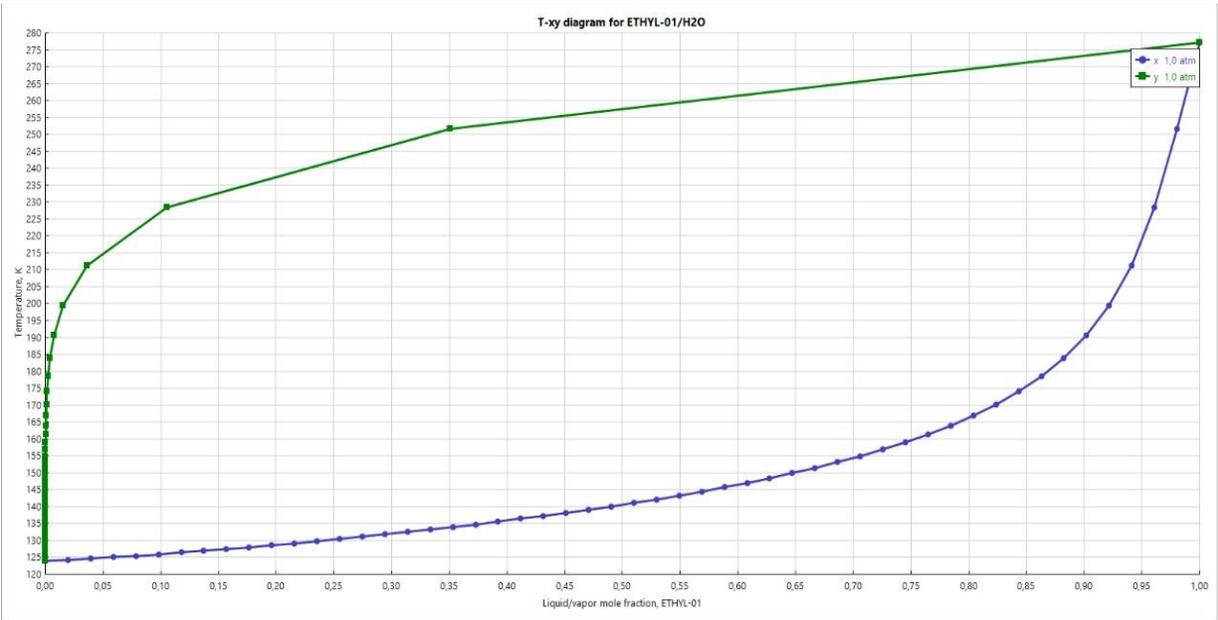
Name	Stage	Convention
▶ RAD-FRAC	19	On-Stage

Product streams

Name	Stage	Phase	Basis	Flow	Units	Flow Ratio	Feed Specs
▶ 13	20	Liquid	Mass		kg/hr		Feed basis
▶ 12	1	Liquid	Mass		kg/hr		Feed basis

Nota. La figura muestra los datos de entrada del equipo D-601 (bloque RAD-FRAC)

Figura 62. Gráfico equilibrio liquido -vapor tipo T-xy de la mezcla H2O/EG



Nota. La figura muestra el comportamiento de la mezcla H2O/EG en la simulación realizada en Aspen Plus V9

ANEXO 14.

ESPECIFICACIONES Y DIMENSIONAMIENTO EQUIPO CENTRIFUGA C-501

Figura 63.

Especificaciones de entrada ingresadas en el bloque “CFUGE” en la centrifuga C-501

The image displays two screenshots of a software interface for configuring a centrifuge. The top screenshot shows the 'Specifications' tab selected, with the 'Model' dropdown set to 'Decanter'. Below this, the 'Perforated basket configuration specifications' section contains two dropdown menus: 'Diameter' set to 'meter' and 'Rate of revolution' set to 'rpm'. The bottom screenshot shows the 'Deliquoring' tab selected, with the 'Decanter deliquoring model' dropdown set to 'Specify residual moisture'. Below this, the 'Decanter deliquoring model parameters' section contains several input fields and dropdown menus: 'Residual moisture' is set to '0,15', 'Moisture basis' is set to 'Wet', 'Critical throughput' has a unit dropdown set to 'kg/hr', 'Stahl Parameter' has a unit dropdown set to 'sqm/sqsec', and 'Schubert saturation coefficient' is set to '2,5'. Other parameters like 'Residual moisture at small throughput', 'Redeker correlation factor a', 'Redeker correlation exponent b', 'Stadager f2 parameter', and 'Residual cake saturation' have empty input fields.

Nota: Esta figura muestra las especificaciones ingresadas a la centrifuga C-501.

Figura 64.

Proporciones obtenidas en el dimensionamiento de la canasta a partir del radio de la centrifuga C-501

Ratios of perforated basket dimensions to radius	
Liquid surface	0,738
Filter cake surface	0,79
Height	0,9545

Nota. Esta figura muestra las proporciones de la centrifuga C-301 en relacion con su radio.

Figura 65.

Dimensionamiento obtenido de la centrifuga C-501

Name	ECT BATCH
User tag number	CF-301
Remarks 1	Equipment mapped
Quoted cost per item [EUR]	
Currency unit for matl cost	
Number of identical items	
Installation option	
Material	
Centrifuge diameter [meter]	1,15175

Nota. Esta figura muestra el dimensionamiento de la centrifuga C-301

ANEXO 15.

ILUSTRACIÓN DE LOS COSTOS DE LOS EQUIPOS Y UTILIDADES EN ASPEN PLUS

Figura 66.

Costo de las utilidades que existen en aspen plus

Name	Fluid	Rate	Rate Units	Cost per Hour	Cost Units
Electricity		103,723	KW	7,32135	USD/H
AP-UTIL-U-9	Steam	368292	KJ/H	0,810242	USD/H
AP-UTIL-U-3	Water	147451	KJ/H	0,122178	USD/H
AP-UTIL-U-8	Steam	1,84124E+06	KJ/H	70,4589	USD/H
AP-UTIL-U-1	Propane	508140	KJ/H	19,9396	USD/H
AP-UTIL-U-2	Propane	60084,2	KJ/H	0,011349	USD/H

Nota. Esta figura muestra los costos de las utilidades que se requieren para el proceso.

Figura 67.

Costo de los equipos utilizados en el proceso de glicolisis

	Name	Equipment Cost [USD]
▶	R-101	79.500
▶	HX-101	9.800
▶	HX-201	9.300
▶	HX-301	9.100
▶	CF-301	128.400
▶	F-101	48.300
▶	C-301	164.300
▶	M-101	47.000
▶	D-402	192.300

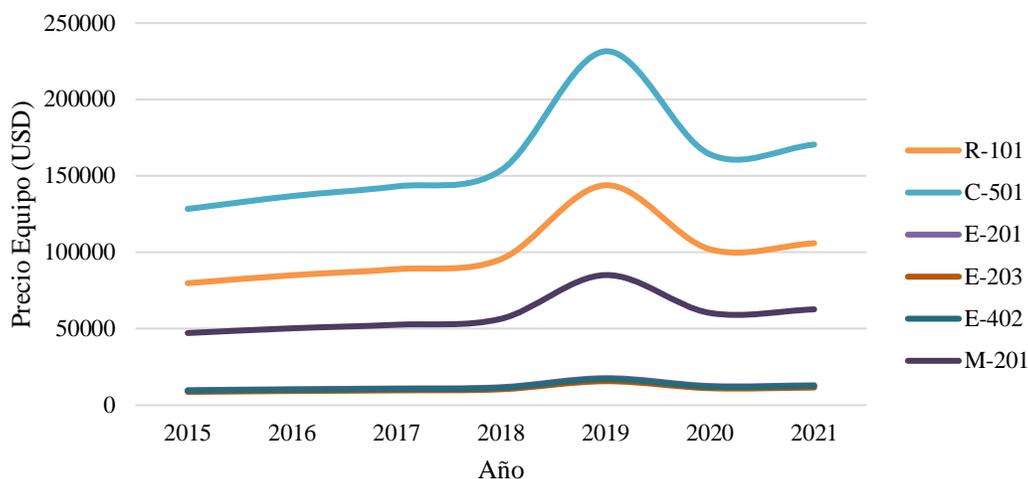
Nota. Esta figura muestra los costos de los equipos que se requieren para el proceso

ANEXO 16.

GRÁFICAS: AJUSTE DE COSTOS DE LOS EQUIPOS EN PERIODOS (2015-2021)

Figura 68.

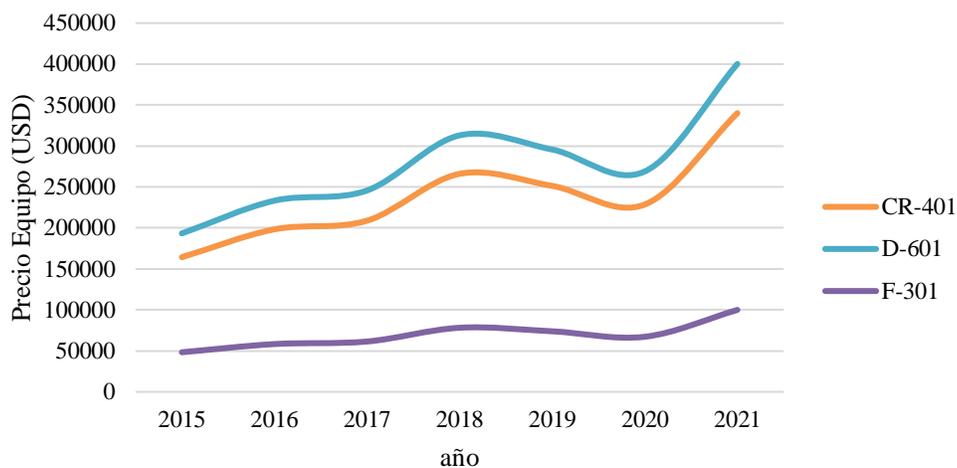
Grafica ajuste precio equipos diseñados con acero al carbono.



Nota. Esta figura muestra el ajuste de costos en los equipos diseñados con acero al carbono.

Figura 69.

Grafica ajuste precio equipos diseñados con acero inoxidable 304.



Nota. Esta figura muestra el ajuste de costos en los equipos diseñados con acero inoxidable 304

ANEXO 17. ILUSTRACION DE LAS BIBLIOMETRÍAS

Figura 70.

Bibliometrías estudiadas y realizadas mediante el software bibliometrix



Nota: Esta figura muestra las bibliometrías arrojadas por bibliometrix.

ANEXO 18.

RECOMENDACIONES

La operación unitaria propuesta para la separación del BHET sólido denominado cristalización, presenta actualmente limitada información experimental, por tal razón se recomienda realizar un estudio cinético experimental respecto a la reacción de nucleación de este monómero, esto con el fin de brindar un dimensionamiento más profundo del equipo a utilizar en esta operación unitaria.

Se recomienda realizar un estudio más profundo acerca del tratamiento de los residuos formados en el proceso de glicólisis, con el fin de proponer un diseño que contenga el pretratamiento de los residuos que son los oligómeros y colorantes

El proceso de glicólisis del PET es una tecnología muy adaptable, respecto a variables de operación y equipos a emplear. se recomienda evaluar una posible optimización del proceso, partiendo de variables de operación, relaciones molares de reactivos, técnicas de separación y tipos de catalizadores.

De igual manera, se sugiere realizar un estudio económico del proceso partiendo de los costos preliminares, esto con el fin de plasmar una proyección a futuro del proyecto y evaluar aspectos financieros frente a la viabilidad del proceso.

Realizar un estudio económico más detallado donde contenga flujos de caja y los indicadores económicos (VPN, TIR, TIO), para así determinar cuanta rentabilidad tienen el proyecto y en cuanto tiempo se recuperaría la inversión.

Se recomienda realizar un estudio más profundo respecto al equipo filtro centrífugo, para la separación inicial del PET con el monómero, ya que existe información escasa respecto a las variables en estos equipos, lo cual asegura un dimensionamiento del equipo más profundo y preciso.