



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“Instalación de una planta de producción de Bis Hidroxi Etilen Tereftalato por glicolisis
de PET reciclado”**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero (a) Químico (a)

AUTORES

Bach.: BARDALES CACERES ERICK ROBERT

Bach.: SECLÉN REYNA MERCEDES VERONICA

ASESOR

ING. Dr. JOSE LUIS VENEGAS KEMPER

Lambayeque – Perú

2021



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA E INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUIMICA

**“Instalación de una planta de producción de bis hidroxí etilen tereftalato por glicolisis de
pet reciclado”**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero (a) Químico (a)

AUTORES

Bach.: BARDALES CACERES ERICK ROBERT

Bach.: SECLÉN REYNA MERCEDES VERONICA

Aprobado por:

Ing. Dr. Luis Antonio Pozo Suclupe

PRESIDENTE

Ing. Dr. Ivan Pedro Coronado Zuloeta

SECRETARIO

Ing. Gerardo Santamaria Baldera

VOCAL

Ing. Dr. José Luis Venegas Kemper

ASESOR

LAMBAYEQUE – PERÚ

2021

DEDICATORIA

Dedicado a nuestra hija Kahory Bardales Seclén, nuestra mayor motivación para salir adelante, a nuestros padres por el apoyo constante y a todas las personas que pudieron creer, aquellos que creen y también a todos los que en adelante, deberán iniciar a creer.

INDICE

Pagina del Jurado	ii
Dedicatoria	iii
Índice	iv
Índice de tablas	vi
Índice de figuras	vi
RESUMEN	viii
INTRODUCCIÓN	1
I. ESTUDIO DE MERCADO	3
1.1. Reciclaje de PET	3
1.2. Definición y descripción del producto	4
1.2.1. Principales aplicaciones de BHET	5
1.3. Materia prima e insumos principales	5
1.3.1. PET Reciclado	6
1.3.1.1. Tipos de PET	7
1.3.1.2. Propiedades Fisicoquímicas del PET	7
1.3.1.3. Disponibilidad de PET Reciclado en el Perú	9
1.3.1.4. Precio de PET Reciclado	11
1.3.2. Etilenglicol	11
1.3.2.1. Precio del Etilenglicol	11
1.4. Análisis del mercado	12
1.4.1. Demanda histórica y proyectada de PET	13
1.4.2. Oferta histórica y proyectada de PET	14
1.4.3. Demanda insatisfecha proyectada de PET	15
1.4.4. Demanda insatisfecha proyectada de BHET	15
1.5. Análisis y evaluación de precio de BHET	15
1.6. Tamaño de la planta de BHET	15
1.7. Conclusiones del estudio de mercado	16
1.7. Localización de la planta	17
1.8. Localización de la planta	17
1.8.1. Macro localización	17
1.8.2. Micro localización	17
1.8.2.1. Parque Industrial de Ancón (Lima)	18
1.8.2.2. Parque Industrial Sector 62 (Chilca)	18
1.8.2.3. Zona Industrial Lurín	18
1.8.2.4. Parque Industrial Chutana (Lima)	18
1.8.2.5. Indupark (Pucusana)	19
II. INGENIERÍA DE PROYECTO	21
2.1. Procesos de reciclaje del PET	21

2.1.1. Reciclaje mecánico	21
2.1.2. Reciclaje Químico	22
2.1.3. Reciclaje Energético	24
2.2. Procesos de glicólisis del PET	24
2.2.1. Glicólisis asistida con solvent	24
2.2.2. Glicólisis supercrítica	24
2.2.3. Glicólisis asistida con microonda	25
2.2.4. Glicólisis catalizada	25
2.2.4.1. Sales Metálicas	25
2.2.4.2. Catalizadores heterogéneos	27
2.2.4.3. Líquidos iónicos	28
2.2.4.4. Catalizadores volátiles	28
2.3. Selección del proceso de glicólisis	29
2.4. Descripción detallada del proceso	30
2.4.1. Reciclaje mecánico	30
2.4.2. Glicólisis con catalizador volátil	31
2.5. Balance de masa y energía	34
2.6. Diseño y selección de equipos de proceso	36
2.6.1. Planta de reciclaje mecánico	36
2.6.2. Reactor	36
2.6.3. Filtro	37
2.6.4. Intercambiador catiónico	37
2.6.5. Intercambiador aniónico	37
2.6.6. Cristalizador – enfriador	38
2.6.7. Filtro de BHET sólido	38
2.6.8. Secador	39
2.7. Consideraciones ambientales	39
III. ESTUDIO ECONÓMICO FINANCIERO	41
3.1. Estimación de inversión total	41
3.1.1. Capital fijo total	41
3.1.1.1. Costo directo o fijo	42
3.1.1.2. Costos indirectos	42
3.1.2. Capital de puesta en marcha o capital de trabajo	45
3.1.3. Estimación del costo total de producción	47
3.1.3.1. Costo de manufactura	47
3.1.3.2. Gastos generales (VAI)	49
3.1.3.3. Costo total de fabricación	50
3.1.3.4. Costo unitario	50
3.1.4. Balance económico y rentabilidad	52
3.1.4.1. Retorno sobre la inversión	52

IV. CONCLUSIONES	54
V. RECOMENDACIONES	55
VI. BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXOS	60
Balance de masa	60
Diseño de equipos de proceso - planta de reciclaje mecánico	65
Diseño de equipos de proceso – Reactor	67
Diseño de equipos de proceso – Filtro	71
Diseño de equipos de proceso - Intercambiador catiónico	74
Diseño de equipos de proceso - intercambiador aniónico	75
Diseño de equipos de proceso – enfriador	76
Diseño de equipos de proceso - filtro de BHET sólido	78
Diseño de equipos de proceso – secador	79
Evaluación económica	81
Inversión total	82
Inversión total del Proyecto	85
Análisis económico	91
BHET caracterización del polímero	94

Índice de Tablas

Tabla 1:	Propiedades importantes de PET amorfo y cristalino	8
Tabla 2:	Características del PET virgen y del PET reciclado (RPET)	9
Tabla 3:	Importaciones peruanas de PET virgen (preformas y resina)	13
Tabla 4:	Balance de masa del proceso de obtención BHET a partir de PET reciclado.	34
Tabla 5:	Inversión total del Proyecto. Elaboración propia	46
Tabla 6:	Costo de Manufactura y Costo Unitario	51
Tabla 7:	Estado de Pérdidas y Ganancias.	53
Tabla 8:	Análisis Económico.	53

Índice de Figuras

Figura 1:	Las cuatro clasificaciones de reciclaje de plásticos.	3
Figura 2:	Estructura bidimensional y tridimensional del BHET.	4
Figura 3:	Usos del BHET para obtención de otros materiales.	5
Figura 4:	Producción mundial de PET al 2015	7
Figura 5:	Cadena demográfica del PET	10
Figura 6:	Tendencia del precio del etilenglicol a nivel mundial	12
Figura 7:	Demanda histórica y proyectada de PET	14
Figura 8:	Parque Industrial Sector 62, en Chilca, mostrando su cercanía al Callao y	20

	Lima.	
Figura 9:	Parque Industrial Sector 62, en Chilca, mostrando su cercanía al gaseoducto.	20
Figura 10:	Diagrama de Bloques de la Glicólisis de PET reciclado	23
Figura 11:	Mecanismo de reacción de glicólisis usando un catalizador metálico.	26
Figura 12:	Depolimerización organocatalítica de PET reciclado de IBM.	28
Figura 13:	Molécula de TBD	29
Figura 14:	Reacción de despolimerización por glicólisis del PET reciclado.	31
Figura 15:	Reciclaje Mecánico del PET reciclado	32
Figura 16:	Glicólisis de PET reciclado con solvente volátil.	33
Figura 17:	Diagrama de flujo del proceso de obtención de BHET a partir de PET reciclado.	34

RESUMEN

El proceso de reciclaje de PET (politereftalato de etileno) se proyecta como pieza elemental del boom ambiental que en la actualidad se vive, así con ello, se posibilita la transformación como una de las más grandes opciones de negocios para la totalidad de la manufactura de los plásticos. Por esta razón se elaboró este proyecto que se ha denominado “Instalación de una planta de producción de Bis Hidroxi Etilen Tereftalato por Glicólisis de PET reciclado”

Como introducción al proyecto se explica en detalle las principales razones que justifican este trabajo de investigación, destacando entre ellas la abundancia botellas de PET que son factible de reciclar.

A través del capítulo I se presenta el estudio de mercado que se ha realizado, analizando la oferta, así como la demanda del BHET a nivel nacional como insumo principal para volver a producir PET virgen. Se estableció que la demanda insatisfecha para el 2028 llegaría a 259539 ton. Por limitaciones de materia prima el tamaño de planta recomendado es de 40000 ton/año.

Mediante el capítulo II se muestra la realización del estudio de Ingeniería de la presente investigación. Para ello se tuvo que seleccionar los pasos de glicolisis con catalizador volátil, totalmente recuperable. El balance de masa indica que se necesita 1.052 kg PET reciclado para obtener 1 kg de BHET.

Por último, se presenta el capítulo III, en el cual se efectuó el estudio Económico-Financiero. Estableciéndose que la inversión total de la investigación sería de 11'978,190 dólares americanos. Siendo el costo para la producción de 0.5519 dólares el kilogramo de BHET. Siendo el precio de 0.75 dólares por cada kilogramo (puesto en la fábrica) obteniéndose una tasa de recuperación sobre la inversión realizada de 60.42 % antes de considerar los impuestos, así como de 43.01 % considerando los impuestos; se consideró un periodo en el cual se recuperará el dinero de 1.67 años posterior a la fecha en la que se pagarían dichos impuestos.

Dado que el catalizador es altamente específico y totalmente recuperable, se considera un proceso amigable con el medio ambiente.

Concluimos finalmente que esta investigación es factible de realizar considerando como punto de vista de mercado, técnico, así como económico, por tanto, recomendamos dicha instalación.

INTRODUCCIÓN

El PET de botellas es considerado como un desecho generado diariamente, no solamente en nuestro país sino además en todos los países del mundo entero, es considerado como la mayor cantidad de este residuo teniendo en cuenta que este sería un material de mucha utilidad en el mercado de la industria refresquera, así como en el embotellamiento de diversos productos con utilidad cotidiana, así como doméstica. El PET es definido como un polímero plástico obtenido a través de un proceso denominado polimerización de monómero de poliéster – bis hidroxietil tereftalato (BHET), el mismo que adicionalmente es producido a nivel de la industria iniciándose con la trans-esterificación entre el dimetil tereftalato, así como el etilen glicol (Méndez, 2016).

El reciclado consiste en un proceso mediante el cual los materiales que ya fueron empleados (desperdicios), en este caso PET, se acondicionan con la finalidad de ser integrados de nuevo al ciclo de producción como materia prima. Para ello existen tres formas básicas y que son diferentes para aprovechar el uso de los recipientes de PET finalizada su vida útil: denominándose reciclaje mecánico, químico, así como también llamado reciclaje energético (Reyes, 2009). El denominado reciclaje mecánico pone de manifiesto dos problemas que son fundamentales: en primer lugar es porque el plástico que ya se utilizó pierde algunas de sus propiedades existentes, obligando a que sea empleado en la elaboración de otros productos que necesiten de menor exigencia; la segunda problemática radica en la dificultad que presenta para conseguir la separación de las distintas clasificaciones de plásticos. (Medina, 2011).

Con el propósito de conseguir un PET virgen a partir de PET reciclado, recientemente se está desarrollando diversas tecnologías a nivel de la industria para implementar el reciclaje de tipo químico, el cual consiste en separar los diversos compuestos básicos de la resina, así como su síntesis y adicionalmente considerando el ahorro de gas, así como del petróleo, debido a que se consideran como las materias básicas del PET. Se ha determinado la existencia de varios procesos para el reciclado químico, de todos ellos se consideran como los más importantes a los siguientes: Metanólisis, glicolisis, así como la hidrólisis (Sinha y Patel, 2010).

El reciclaje químico, llamado también reciclaje terciario, comprende la transformación de la cadena del polímero. Básicamente es una despolimerización que produce las unidades monoméricas, las cuales se pueden polimerizar otra vez y obtener PET virgen. El reciclaje

químico puede realizarse mediante solvólisis o además por pirolisis. La solvólisis comprende la degradación por solventes incluyendo el agua, y la pirólisis comprende la degradación por calor en la ausencia de oxígeno o aire, o vacío. El proceso de solvólisis puede realizarse por: (1) hidrólisis, (2) aminólisis, (3) amonólisis, (4) metanolosis, y (5) glicólisis.

El proceso del reciclaje del PET se proyecta actualmente como un elemento fundamental del boom ambiental vivido en la actualidad, así con ello, se está avizorando como una de las más grandes opciones para generar negocio en la totalidad de la industria del plástico. No obstante, esta debe enfrentar múltiples retos antes de acrecentar su alcance. Analizando un estudio realizado recientemente por la Agencia de Protección Ambiental en los Estados Unidos (US EPA) en la cual asume en sus conclusiones que el proceso del reciclaje siempre resulta beneficioso, teniendo en consideración los parámetros establecidos de energía, así como del carbono. Así también, la Asociación Nacional de Recursos para los recipientes elaborados con PET de Estados Unidos (Napcor) hizo una publicación en el año 2010 de los resultados obtenidos mediante un estudio de inventario del ciclo de vida (LCI) para los PET, así como para los HDPE reciclados. Ese reporte señala que al incorporar el PET reciclado mediante la fabricación de un empaque, este minimiza notablemente la huella de carbono de dicho empaque en condiciones de la energía que se requiere, así como de aquellas emisiones de gases que tienen efecto invernadero. considerando una libra de hojuelas del PET reciclado, la energía que se requiere es minimizada hasta un 84%, así también las emisiones de GHG mediante el 71% (Ortega, 2011).

Por lo tanto, se considera, desde el punto de vista ambiental, emplear una ruta ecológica para reciclar el PET y obtener BHET, el monómero principal para producir PET virgen.

Por desarrollar la presente investigación se consideran tres objetivos específicos, tales como: el realizar el estudio de mercado, de ingeniería, así también el económico-financiero.

CAPITULO I

ESTUDIO DE MERCADO

1.1. RECICLAJE DE PET

El PET (polietileno tereftalato) representa aproximadamente el 18% de la producción mundial de polímeros y es el tercer polímero más producido, después del polietileno (PE) y el polipropileno (PP). Los dos usos principales de la resina PET son la fibra para fabricar textiles de poliéster y para aplicaciones de estado sólido, como botellas, recipientes, películas y polímeros de grado de ingeniería. Aquellas diferencias presentes en las características físicas existentes en los polímeros tienen implicaciones importantes para el reciclaje de PET y, a menudo, son el principal determinante para hacer coincidir los materiales de alimentación con los requisitos de rendimiento de los productos finales que se utilizan para hacer.

Hay cuatro clasificaciones principales de reciclaje: primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria. La calidad o las propiedades físicas de las materias primas son menos críticas cuanto más se avanza en este continuo de reciclaje. El grado de transformación del material también aumenta al igual que las opciones de aplicación final para los materiales reciclados.

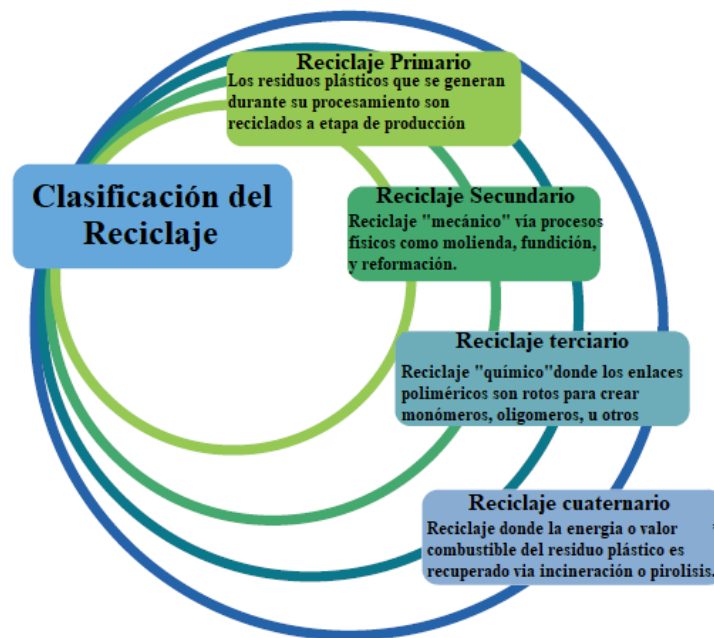


Figura 1: Las cuatro clasificaciones de reciclaje de plásticos.

Recuperado de: Greenblue, 2018.

En los últimos años, el concepto de reciclaje químico ha sido promovido por la industria como una posible solución para ayudar a frenar la contaminación plástica y la gestión de residuos en general. Por este motivo en el presente proyecto se ha considerado utilizar uno de los métodos de reciclaje químico, como es la glicólisis del PET para la obtención de BHET.

1.2.DEFINICION Y DESCRIPCION DEL PRODUCTO

El producto del presente proyecto es el monómero tereftalato de bis (2-hidroxietieno), o también BHET por sus siglas del inglés Bis (2-hidroxyethyl) terephthalate.

Su fórmula molecular es $C_{12}H_{14}O_6$ y tiene la siguiente estructura:

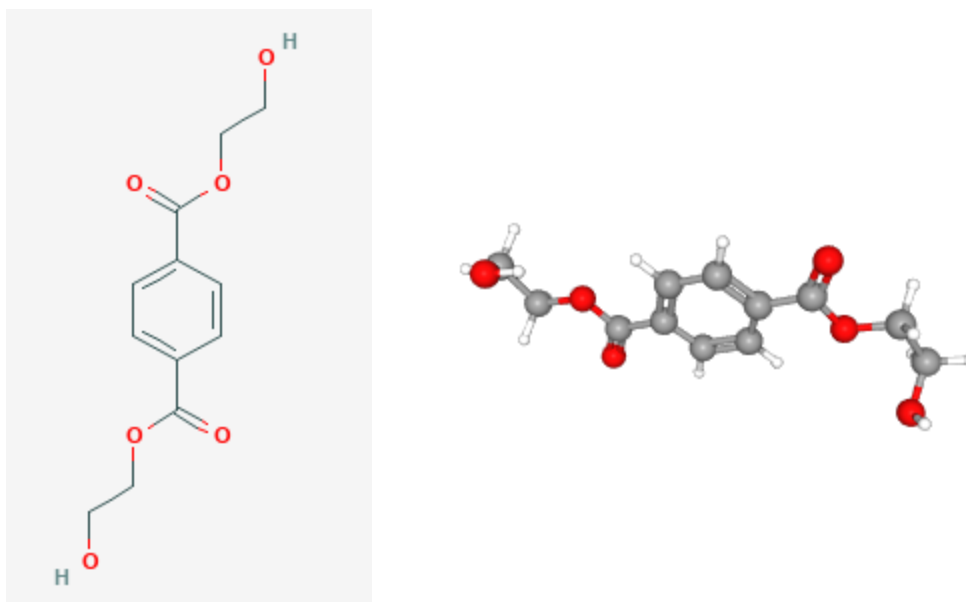


Figura 2: Estructura bidimensional y tridimensional del BHET.

Recuperado de https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Bis_2-hydroxyethyl_-terephthalate#section=3D-Conformer

Algunas propiedades físicas y químicas se detallan a continuación:

Peso molecular: 254.238 g/mol

Apariencia: polvo blanco

Densidad: 1.3 (\pm 0.1) g/cm³

Punto de fusión: 106°C

Solubilidad en agua: 17.61 g/L

Punto de inflamación: 172 (\pm 19.4) °C

Punto de ebullición: 4465°C a 760 mm Hg

Químicamente se produce tanto por la reacción del dimetil tereftalato (DMT) y etilenglicol (EG), o por esterificación directa del EG con ácido tereftálico.

1.2.1. Principales aplicaciones de BHET

Los principales usos de tereftalato de bis (2-hidroxietieno) se resumen en la Figura 3. Destaca el uso principal de este insumo que es la producción de PET de alta pureza. De esta manera se crea una económica circular, pues el PET reciclado se despolimeriza a BHET y este se vuelve a polimerizar para producir PET virgen.

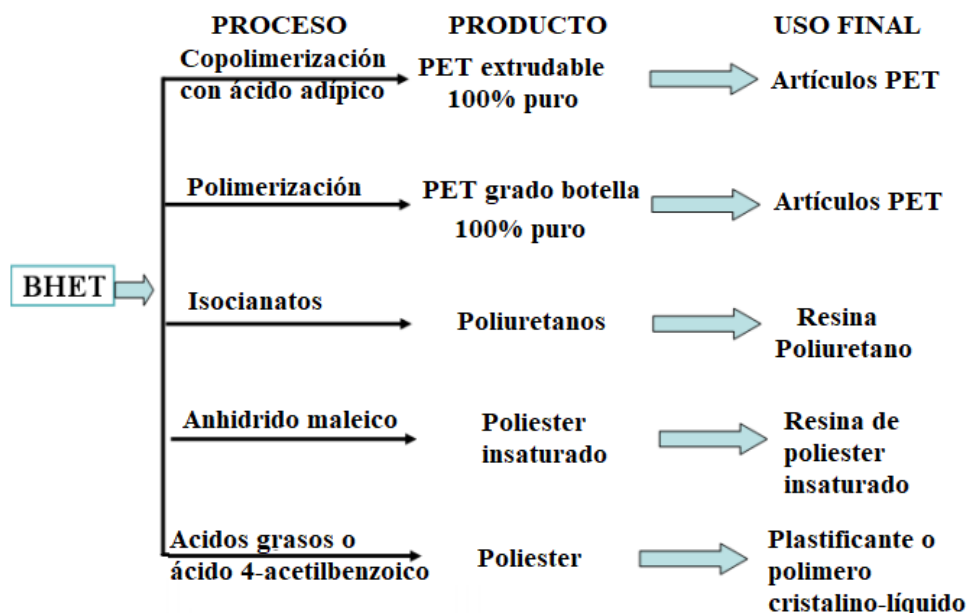


Figura 3: Usos del BHET para obtención de otros materiales.

Nota: el principal uso es la producción de PET de alta pureza, (Mohamad y Sayaf, 2012).

1.3. MATERIA PRIMA E INSUMOS PRINCIPALES

La materia prima principal para este proyecto es el PET reciclado y como insumo principal se va emplear el etilenglicol.

1.3.1. PET RECICLADO

El PET, cuyas siglas corresponden al Tereftalato de polietileno, es considerado como la clase de plástico que deberá utilizarse con mayor frecuencia en aquellos envases de las bebidas, especialmente las botellas para el agua mineral, así como en los textiles. El proceso de reciclaje del PET, cuenta con una enorme importancia dentro de la clasificación de los plásticos por su gran utilización. afortunadamente el PET es considerado como el plástico que es mayormente reciclado en todos los países del mundo, además se considera como el menos perjudicial en el medio ambiente comparando con los otros tipos de plástico, cabe mencionar como ejemplo al PVC. Ello no quiere decir que sea una excepción de ocasionar daños al medio ambiente, debido a que en su fabricación se emplean metales pesados, así como sustancias que son irritantes y que son expulsadas al medio ambiente.

Para identificar estos envases es muy sencillo: debemos ubicar sus siglas PET o PETE (que corresponden al polietileno de tipo tereftalato, en inglés) las cuales las podemos identificar ya que estas se ubican en los fondos de cada envase, los mismos que se aprecian dentro de un triángulo que se forma mediante flechas, así como también el número 1:



Actualmente el PET es utilizado de diversas maneras; en primer lugar como envase siendo este tal vez el uso que más se conoce, empleándose en las bebidas carbónicas, aceite, aguas minerales, zumos, té, así como también en bebidas isotónicas, vinos, bebidas alcohólicas, salsas entre otros alimentos, detergentes, así también en diversos productos utilizados en la limpieza, cosméticos, productos químicos, lubricantes o además en aquellos productos que son utilizados para diversos tratamientos en la agricultura. Para el film, se utiliza en contenedores alimentarios, laminas, audio/video, así como en fotografía, blisters, films “high-tech”, embalajes especiales, aplicaciones eléctricas como electrónicas. Adicionalmente se ha determinado la existencia de un amplio sector en el cual este material es utilizado para la construcción de una diversidad de elementos como: fibra textil, alfombras, tuberías, perfiles, pieza inyectadas, construcción, automoción, entre otros más.

A través de la figura 4 se resume la producción mundial de PET y sus respectivos usos según el tipo de PET, indicando además el uso final.

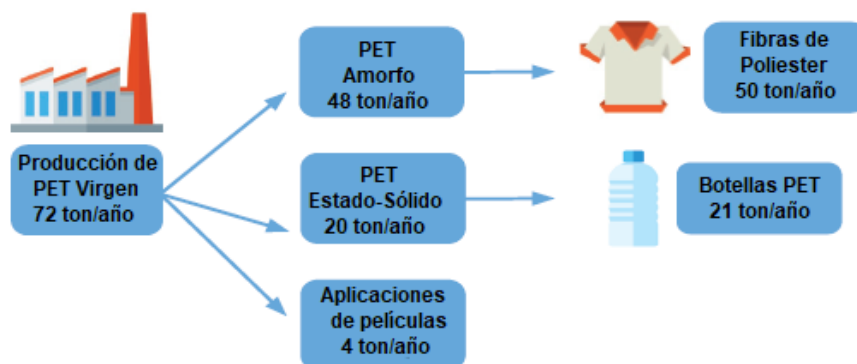


Figura 4: Producción mundial de PET al 2015.

1.3.1.1. Tipos de PET

El PET puede ser clasificado teniendo en cuenta sus aplicaciones consideradas como las más importantes, pero además teniendo en cuenta su naturaleza. Se ha determinado la existencia de diferentes grados de la resina del PET (aplicabilidad), los que podrían diferenciarse teniendo en cuenta su peso molecular, aquellas que cuentan con un menor peso se les conoce como fibra, aquellas que cuentan con mayor peso se les llama de grado ingeniería (grado botella), se señala además que existen otras cuyo peso se ubica en un intervalo intermedio denominándoseles como grado película. Se ha determinado la existencia de tipos de PET (naturaleza), siendo estos los obtenidos a través de la modificación de la fórmula básica, siendo este el denominado polímero cristalino, el amorfo, así como el reciclado, siendo éste último el que divide en el post industrial, así como el de post consumo.

Para el presente proyecto se considera el PET reciclado post consumo. Es decir, todo tipo de PET que ya ha tenido un uso, como por ejemplo los envases de bebidas gaseosas y aguas de mesa.

En la síntesis, al efectuarse la polimerización a medida que la cadena del polímero se empieza a alargar se aprecia la liberación de una molécula de glicol, por tanto, el peso molecular, así como también la viscosidad tienden a incrementarse dando como consecuencia el gozar de mayor resistencia química (Zamudio y Cuervo, 2013).

1.3.1.2. Propiedades Fisicoquímicas del PET

actualmente el PET ha conseguido sobresalir en diversos escenarios de la industria, haciéndolo bueno para poder ser utilizado en múltiples utilidades teniendo en cuenta el nivel de cristalinidad de dicho polímero. Cabe mencionar que una de las particularidades primordiales del PET está determinada por su transparencia la que se encuentra unida directamente al grado de su cristalinidad, siendo este transparente al ser amorfo (grado botella), así como puede ser opaco cuando es cristalino (grado fibra).

En la Tabla 1, presentamos las características con mayor relevancia para un arreglo termoplástico amorfo, así como un termoplástico cristalino.

Tabla 1

Propiedades importantes de PET amorfo y cristalino

Propiedades	Tipo de PET	
	PET amorfo	PET cristalino
Densidad, g/cm ³	1.34	1.38
Absorción de agua, %	0.16	0.1
Resistencia a la tensión, N/mm ²	55	81
Elongación, punto de ruptura, %	300	70
Resistencia dieléctrica, KV/cm	450	600
Temperatura de deflexión		
1.86 N/mm ² , °C	70	80
0.45 N/mm ² , °C	72	115

Nota: Zamudio y Cuervo, 2013.

Las diferencias existentes entre las características que posee el PET reciclado (RPET) que se ha comparado mecánicamente con las del PET virgen se puede atribuir primordialmente a la historia térmica adicional que ha experimentado el material que ha sido reciclado, dando como resultado una disminución en el peso molecular, así como un incremento experimentado en el ácido carboxílico, color, así como también en el nivel de acetaldehído. Algunas investigaciones realizadas han determinado que el RPET cuenta con un módulo de Young menor, mayor elongación a la rotura, así como también alta resistencia al impacto experimentado por el PET virgen. Por tanto, el RPET se considera que es más dúctil siempre y cuando el PET virgen sea

más frágil; siendo este un resultado gracias las diversas diferencias existentes en la cristalinidad entre los diversos materiales.

Tabla 2

Propiedades del PET virgen y del PET reciclado (RPET)

Propiedad	PET virgen	RPET
Módulo de Young [MPa]	1890	1630
Resistencia a la rotura [MPa]	47	24
Elongación a la rotura [%]	3,2	110
Resistencia al impacto [J m ⁻¹]	12	20
IV (dl g ⁻¹)	0.72 – 0.84	0.46 – 0.76
Temperatura de fusión (°C)	244 - 254	247 - 253
Peso molecular (g mol ⁻¹)	81600	58400

Nota: Encontrado en Tecnología de los Plásticos, 2019

1.3.1.3. Disponibilidad de PET Reciclado en el Perú

Nuestro país elimina cada día un promedio de 18,000 toneladas de residuos sólidos, aproximadamente la mitad se ubica únicamente en Lima Metropolitana, así como en la provincia del Callao. Donde el material de reciclaje constituye una cantidad mayor al 25% de los residuos sólidos, específicamente el PET constituye un 1.23% - 1.87% del total. Lo cual expresa que al año se produce en promedio 64,500 toneladas de PET, traduciéndose en una industria mayor a los 300 000 000 de soles, de los cuales el 34% se constituye concretamente a residuos sólidos, puesto que nunca se podrán reutilizar (Andina, 2015). En la Figura 5 se presenta la cadena de distribución del PET en todo el mundo, así como en nuestro país. Demostrándose que la principal fuente de PET reciclado estaría constituido por los envases de agua de mesa o de bebidas gaseosas.

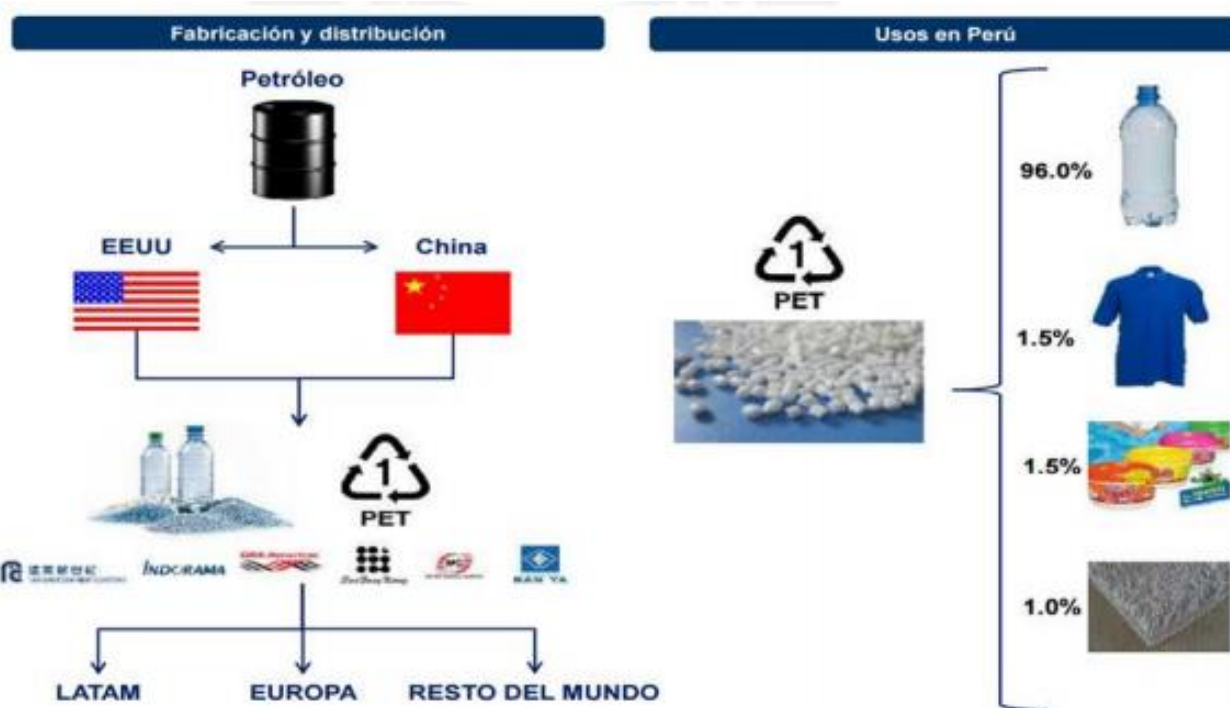


Figura 5: Cadena demográfica del PET.

Nota: recuperado de Gallo, 2015.

Aproximadamente en el año 2015, 9.7 MM de personas viven en Lima Metropolitana, así como también en la provincia constitucional del Callao, las mismas que consumen y a la vez eliminan cada día más de 177 toneladas de material del PET. Lo cual representa una gran oportunidad económica, así como ambientalmente sostenible, gracias a la gran cuota de productos reciclables que no serían vertidos en los diversos rellenos sanitarios o en aquellos vertederos informales de residuos sólidos y que además tengan la posibilidad de ser reutilizados por la industria sin disminuir la calidad de estos. (Olivera, 2016).

En estudio reciente realizado por el Comité de Plásticos de la Sociedad Nacional de Industrias la totalidad de residuos plásticos que se genera a nivel nacional es de 18000 ton/mes o 216000 ton/año, de los cuales 10000 ton/mes o 120000 ton/año corresponde al PET. De este total se recicla efectivamente solo 30% del PET, un valor muy bajo si se compara con Brasil, México y Japón, quienes tienen niveles de reciclaje de PET de 55.6%, 60.0% y 77.9%, respectivamente (Salazar, 2017). Por lo tanto, aumentando el nivel de reciclaje del PET se dispondría de mayor materia prima para el presente proyecto.

1.3.1.4. Precio de PET Reciclado

El precio del reciclador primario al recolector mayorista varía entre 0.40 a 0.50 soles por kilogramo. El procesador del PET reciclado compra a los grandes acopiadores a 0.6 a 0.8 soles/kg (Mendoza y Troncoso, 2018). Para la presente investigación se considerará un precio promedio de 0.70 soles/kg, es decir, 0.20 dólares por kilogramo.

1.3.2. ETILENGLICOL

Se debe considerar que aquellos hidrocarburos que poseen dos grupos hidroxilos se les llama también glicoles. El glicol que deriva del etano es un hidrocarburo denominado etilenglicol. Su producción considerada en todos los países del mundo supera los 23 mil millones de kg al año. El etilenglicol, 1-2 etanediol posee un peso molecular de aproximadamente 67.2 g/mol. Este es un líquido viscoso, no volátil, incoloro, higroscópico, de sabor dulce, además soluble en agua. Es utilizado en la fabricación de soluciones anticongelantes, así como también para descongelar automóviles, aviones, así como embarcaciones. Además es utilizado también en los líquidos de los frenos hidráulicos, así como en la tinta utilizada en almohadillas en los sellos de goma, lapiceros, así como también en los talleres de imprenta (GMT, 2014).

Algunas propiedades físicas y químicas importantes son:

Gravedad específica (Agua = 1): 1.10 a 20°C

Punto de ebullición: 197.6°C a 760 mmHg

Punto de fusión: -13°C

Densidad relativa del vapor (Aire =1): 2.14

Presión de vapor: 0.05 mmHg a 20°C

Viscosidad: 21 cp. a 20°C

pH: neutro

Temperatura de inflamabilidad: 111°C

Temperatura de autoignición: 398°C

Solubilidad: es soluble en el agua, en los alcoholes alifáticos, así como en la acetona. Presenta poca solubilidad en benceno, tolueno, diclorometano, así como en el cloroformo.

1.3.2.1. Precio del Etilenglicol

El precio internacional del etilenglicol con una pureza mayor a 99.8% varía según su

procedencia. En la Figura 6 se presenta el precio del etilenglicol o monoetilenglicol (MEG) en distintos países del mundo.

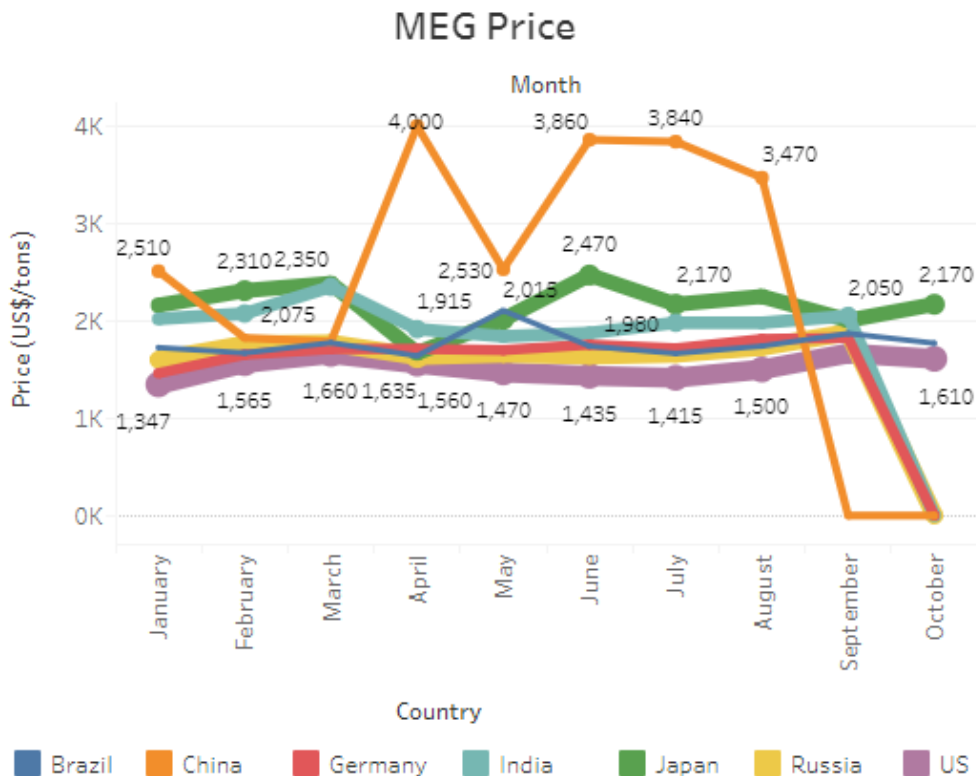


Figura 6: Tendencia del precio del etilenglicol a nivel mundial

Nota: en Estados Unidos se tiene los menores precios. Recuperado de Plastics Insight, 2019.

En los Estados Unidos su precio fluctúa de 1347 a 1610 dólares cada la tonelada. Para esta investigación se tendrá en cuenta un precio promedio de aproximadamente 1500 dólares la tonelada.

1.4.ANALISIS DEL MERCADO

El BHET es considerado como el insumo primordial para la elaboración del PET virgen. Por lo cual, en esta sección se realiza el estudio de mercado teniendo como base principal la demanda, así como la oferta del PET virgen, que normalmente nuestro país compra de importación.

Según rendimiento de la glicólisis de PET obtenidos en planta industrial se necesita aproximadamente 115 kg de PET para producir 100 kg de BHET (Zamudio y Cuervo, 2013). Este factor se utilizará para determinar la necesidad de BHET equivalente a la demanda proyectada de BHET.

1.4.1. Demanda histórica y proyectada de PET

La demanda corresponde a la ecuación básica:

Demanda: Producción + Importación – Exportación

En razón que no hay producción de PET, la demanda corresponde solo a la diferencia de importaciones menos exportaciones.

Según estudios recientes se ha determinado que el incremento ha sido exponencial en los últimos años, presentado una relación directa con el mayor consumo de agua envasada, jugos y bebidas gaseosas. Con los datos históricos y utilizando Excel se hace la proyección de la demanda para el 2028.

Tabla 3

Importaciones peruanas de PET virgen (preformas y resina)

Año	Importaciones (ton)	Exportaciones (ton)	Demanda (ton)
2009	96529	9734	86795
2010	98286	10328	87958
2011	105938	9008	96930
2012	105376	11450	93926
2013	104599	11001	93598
2014	125358	11603	113755
2015	141026	12556	128470
2016	156874	12844	144030
2017	168004	13701	154303
2018	189243	14339	174904

Nota: obtenido de SNI-IEES, 2019

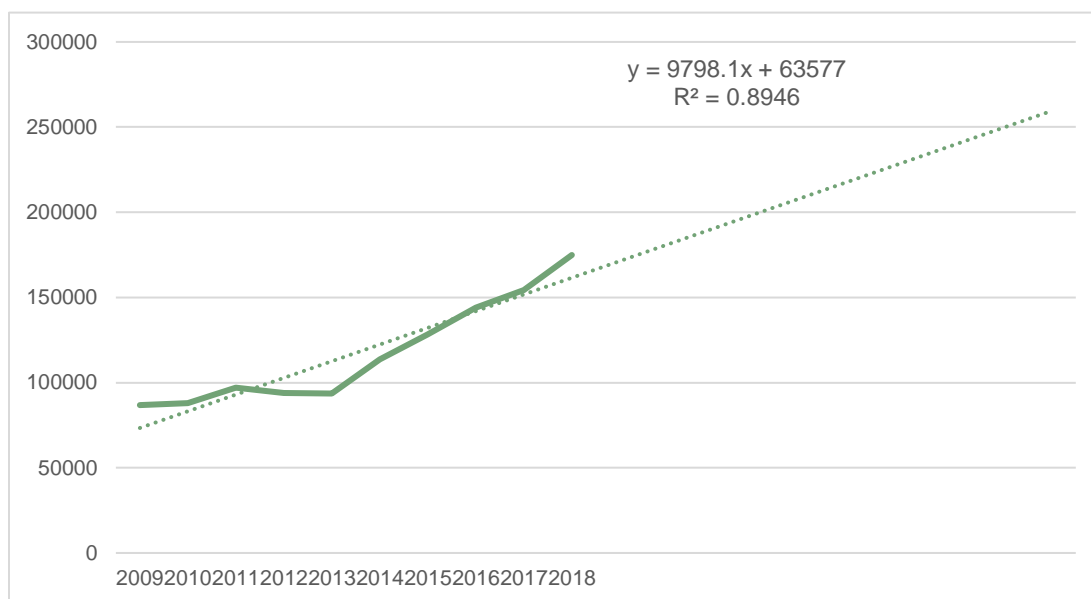


Figura 7: Demanda histórica y proyectada de PET

Nota: elaborado por los autores

Según el ajuste de datos a una regresión lineal se obtuvo un $R^2 = 0.8946$, el cual se considera suficiente. Para el 2028 la demanda proyectada de PET alcanzaría los 259539 ton.

1.4.2. Oferta histórica y proyectada de PET

Como todos los plásticos en sus formas primarias, el PET también es un insumo de importación, llegando a nuestro país en sus formas como resina pura en forma de pellet, y en preformas para la producción de frascos para envasar agua, gaseosas, jugos, aceites entre otros. A nivel de toda la industria de plásticos las importaciones han crecido de 1 533 000 000 de dólares en el año 2008 hasta 2 249 000 000 de dólares en el año 2018, y en condiciones de volumen, pasó de 759 mil toneladas a 1262 mil toneladas (SIN-IEES, 2019). Estos datos demuestran que existe una gran posibilidad de reemplazar las importaciones por un posible PET de producción nacional en base al BHET que se desea producir.

Por lo tanto, la oferta histórica y proyectadas se considera nula. La posibilidad de instalar una planta de BHET que por polimerización produce PET virgen, permitirá ofertar este producto para la industria de plásticos, en especial de envases.

1.4.3. Demanda insatisfecha proyectada de PET

La demanda que se proyectó para el año 2028 que no se pudo satisfacer es mayor a 259539 toneladas, siendo este el resultado de restar la demanda proyectada menos la oferta proyectada.

1.4.4. Demanda insatisfecha proyectada de BHET

Considerándose que el BHET se convierte fácilmente e inmediatamente a PET virgen, por policondensación, rindiendo aproximadamente 1 kg de PET virgen por 1 kg de BHET (Mohamad y Sayaf, 2012), la demanda que no se pudo satisfacer de BHET para el período del año 2028 será también igual a las 259539 toneladas.

1.5. ANALISIS Y EVALUACION DE PRECIO DE BHET

El precio promedio en el mercado internacional varía entre 578 a 872 dólares la tonelada (ChemicalBook, 2019). Para el proyecto se va considerar el promedio, es decir 750 dólares por tonelada.

1.6. TAMAÑO DE LA PLANTA DE BHET

Es conocida como tamaño de una planta industrial a la volumen instalada en la producción de esta. Los elementos que estipulan o condicionan el tamaño de una planta son:

La demanda: la cantidad propuesta debe ser menor que la demanda proyectada, y de esta manera se podría evitar mucha capacidad instalada ociosa. No es un factor limitante, la proyección alcanza a una demanda insatisfecha de 259539 toneladas para el 2028.

Materia Prima: se necesita PET reciclado, el cual solo se tiene disponible un 30% del total de 120000 toneladas de PET que se recicla actualmente, es decir 36000 toneladas. Este sería el factor limitante para el nuevo proyecto, porque hay que tener en cuenta que gran parte o casi todo lo que se recicla es sometido a un reciclaje mecánico, quedando poco o casi nada para producir BHET.

Tecnología: en nuestro país existen distintas plantas industriales de procesos químicos y por lo tanto no sería un factor limitante para desarrollar el nuevo proyecto.

Financiamiento: Se considera que existe suficientes inversionistas relacionados a la industria de los plásticos que puedan financiar este tipo de proyecto. No representa un elemento que limite.

Entonces el tamaño que posee una planta de producción de BHET depende definitivamente del PET reciclado. A nivel nacional se tiene actualmente una disponibilidad de 36000 toneladas, de las cuales se asume que 50% se exporta como escamas a otros países donde se reprocesa a PET virgen y otros 50% son pelletizados para ser utilizados directamente en nuestro país para algunas aplicaciones. Es decir, se tendría solo una disponibilidad de 18000 toneladas del PET por año.

Proyectando al 2028 se espera que el nivel de reciclaje aumente de los 30% actuales a un nivel de 50 o 60%. Además, según las proyecciones de importaciones de PET virgen para el 2028 se tendrá 1.48 veces más que las importaciones del 2018 y por lo tanto habrá una mayor disponibilidad de PET reciclado, Sumando estos dos factores se proyecta que para el 2028 se dispondría de 36000 toneladas de PET reciclado con el aumento del nivel de reciclaje a un 60%, y 26640 por la mayor importación de PET virgen, es decir en suma 62640 toneladas de PET reciclado para un nuevo proyecto.

Utilizando el factor que se necesita 1.15 kg de PET reciclado por 1.0 kg de BHET, se estaría posibilitando la instalación de una planta de 54470 toneladas de BHET al año. Siendo optimistas en determinar el tamaño de planta, el cual en este caso estaría limitado por la disponibilidad de PET reciclado, se considera producir 40000 toneladas al año, lo que significa 73.4% del total de PET reciclado que se tendría disponible para el 2028.

Por lo tanto, el tamaño de planta definido para este proyecto es de 40000 toneladas de BHET al año, la cual al operar de forma constante 8000 horas por cada año, representaría una capacidad no menor de los 5000 kg/hr.

1.7.CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE MERCADO

Se demuestra que el estudio de mercado existente es un mercado cuantioso para el consumo de BHET, el cual por una simple etapa de polimerización puede transformarse en PET virgen. Según las proyecciones realizadas la demanda que no se pudo satisfacer del BHET con proyección al 2028 llegaría a las 259539 toneladas por cada año.

El precio de venta del producto sería 475 dólares la tonelada. Las dimensiones de la planta estará parametrado por la materia prima disponible, es decir PET reciclado. Según las

proyecciones se dispondría para el 2028 cerca de 62640 toneladas, y el tamaño definido será de 40000 toneladas de BHET para lo cual se necesitaría 73.4% del PET reciclado.

1.8.LOCALIZACION DE LA PLANTA

1.8.1.MACRO-LOCALIZACION

Teniendo en cuenta la macro-localización se pueden considerar como dos elementos más importantes: en primer lugar la disponibilidad de la materia prima, así como el mercado.

Materia prima: la planta que se encargará de la producción de BHET necesita de PET reciclado post consumo, y esta se concentra en las grandes ciudades como Lima, Callao, Trujillo, Chiclayo, Arequipa, Piura. Solamente entre Lima y Callao en el 2015 se desechaban cerca de 177 toneladas de PET por día. Se espera que para el 2018 esta cantidad será 1.48 veces más, es decir 262 toneladas de PET por día. Por lo tanto, Lima o el Callao sería una buena alternativa para instalar la futura planta industrial de producción de PET.

Mercado: estar cerca del mercado traería los menores costos de distribución del producto. Teniendo en cuenta que el BHET es insumo principal para producir PET virgen, se buscaría los consumidores y procesadores de PET, que en su mayoría se encuentran en Lima.

Por lo tanto, por asegurar el abastecimiento de materia prima como por cercanía del mercado consumidor de PET virgen, la mejor alternativa sería Lima, y esta será la única opción para realizar la micro-localización.

1.8.2.MICRO-LOCALIZACION

Siendo Lima el lugar recomendado en la etapa de macro localización, se debe considerar que existen cuatro lugares tradicionales para la ubicación de plantas industriales, con todas las facilidades que se requieren: Av. Argentina, Huachipa, Ate y Villa El Salvador. Sin embargo, los precios por metro cuadrado son muy elevados, existe poca disponibilidad de espacio, en un marco de alta turgencia y vías estrechas, lo cual conlleva a una ineficiencia logística y sobre costos. Esto, sin contar con la inseguridad de la Av. Argentina y Villa El Salvador.

Para resolver esta deficiencia de zonas industriales con los distintos problemas expuestos, el Ministerio de la Producción (PRODUCE) reconoce que existen cinco zonas conocidas como parques eco-industriales, todos ubicados en Lima, y que son:

1.8.2.1. Parque Industrial de Ancón (Lima): creado a través de la Resolución Suprema N° 02-2016-EF, la cual se publicó el día 23 de junio del año 2016, concediéndose 1,338 hectáreas en la ubicación del Parque Ecológico del mencionado distrito de Lima. Está ubicado entre el km 47 y 50 de la carretera Panamerica Norte. El futuro parque industrial de Ancón está muy cerca del puerto de Chancay, lo cual daría facilidades para las importaciones de etilenglicol. Además, también se encuentra cercano al puerto del Callao, así como al Aeropuerto Internacional Jorge Chavez.

1.8.2.2. Parque Industrial Sector 62 (Chilca): ubicada en Cañete, específicamente en el distrito de Chilca y alojará un promedio de 100 fábricas en una extensión de 212.3 hectáreas, ubicada en el kilómetro 62 de la Panamericana Sur, así como a 45 minutos de la ciudad de Lima y a noventa minutos del puerto del Callao, así también a 150 minutos del puerto de Pisco. El costo por m² es de 100 dólares. Debe contar con los servicios básicos de energía eléctrica, un sistema de agua con tres pozos de 250 litros por segundo, así como desagües con conexiones domiciliarias, así también con seguridad mediante la vigilancia perenne, iluminación pública, así como también con áreas verdes. Además, contará con algunos servicios complementarios como: comercios, centro bancario, así como servicios gubernamentales que permitan dar facilidades para las empresas. Un punto muy importante que está a dos kilómetros del gaseoducto de gas natural (Ministerio del Ambiente, 2019). Esta última característica permitiría generar energía térmica a bajo costo.

1.8.2.3. Zona Industrial Lurín: conocido como el proyecto Macrópolis, del Grupo Centenario, ubicado en Lurín contando con facilidad a su acceso desde la Panamericana sur a mediante el Puente San Pablo, así como el Puente Arica y además desde las avenidas Portillo como la Industrial. Este proyecto cuenta con 980 hectáreas de extensión total, cada lote industrial con un área desde 10,000 metros cuadrados. Esta ciudad industrial cuenta con una infraestructura diseñada especialmente para las plantas industriales con vías anchas, intercambios viales amplios, áreas verdes, así como también pórtico de seguridad, entre otros. MacrOpolis tiene espacios de zonificación tipo I2 (industria liviana) así como I3 (gran industria). Además

considera el desarrollo futuro de zonas para bodegaje, así como un área comercial de 10 y 12 hectáreas, respectivamente.

1.8.2.4. Parque Industrial la Chutana (Lima): El Centro Industrial La Chutana está ubicado a 35 minutos al sur de Lima Metropolitana, en el kilómetro 60 de la Panamericana Sur, ubicado en el valle de Chilca. Este proyecto reúne las condiciones propicias para el desarrollo industrial ya que está alejado de los centros poblados y del mar. El terreno tiene planicies, cerros, así como laderas con vistas ininterrumpidas al valle de Chilca y está proyectado para más de 100 años sin temor a cambios de zonificación. Cuenta con 525 hectáreas para la industria, con lotes desde 2,500 metros cuadrados para almacenes e industrias livianas y pesadas, tanto para la venta como alquiler. Este centro industrial ha habilitado 220 hectáreas con vías pavimentadas, instalaciones sanitarias, eléctricas y fibra óptica.

1.8.2.5. Indupark (Pucusana): El proyecto industrial Indupark se localiza en el distrito de Chilca, a 45 minutos de Lima y además a tres minutos del intercambio vial del Pucusana, en el kilómetro 57,5 de la Panamericana Sur. Esta tiene redes de agua, así como de desagüe, también con una planta para tratar las aguas efluentes. Además, cuenta con una red eléctrica de media tensión, así como también con un sistema de alumbrado público. Gracias a todos los servicios con los que cuenta este proyecto, así como su ubicación, además del acceso a la zona, las empresas pueden mantenerse operativas las 24 horas del día, así como los siete días de la semana. Esta empresa ha iniciado el desarrollo de Indupark 2 en Chilca, puesto que podrá contar con las mismas características del primero.

Según la información mostrada se tiene en resumen tres lugares posibles: Chilca, Lurín y Ancón. Donde existen más parques industriales es Chilca. De estos, Parque Industrial Sector 62 está a 45 minutos de Lima y 2:15 del Callao, como se puede apreciar en la Figura 8. Los lugares disponibles en el Parque Industrial Sector 62 se aprecia en color verde en la Figura 9.

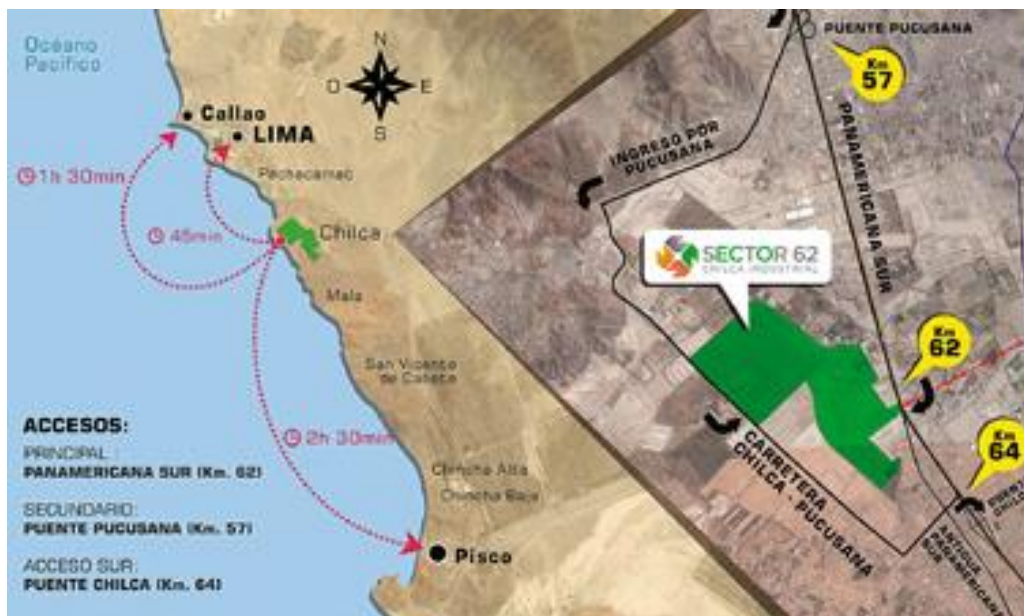


Figura 8: Parque Industrial Sector 62, en Chilca, mostrando su cercanía al Callao y Lima.

Nota: recuperado de construccionyvivienda.com



Figura 9: Parque Industrial Sector 62, en Chilca, mostrando su cercanía al gaseoducto.

Nota: recuperado de Ministerio del Ambiente, 2019.

CAPITULO II

INGENIERÍA DE PROYECTO

El estudio de ingeniería del proyecto comprende la selección del proceso más adecuado, y la descripción detallada del proceso seleccionado. En base al proceso seleccionado se puede realizar el balance de masa, así como de la energía para luego pasar al de la selección de aquellos equipos principales para el proceso, y en base a las dimensiones de estos equipos realizar la distribución de la planta industrial. Al finalizar se establece una sección de consideraciones ambientales que analiza brevemente los posibles efectos ambientales que ocasionaría lo que se instale la planta de producción del BHET a partir de PET reciclado. Al inicio se hace un breve estudio de las formas de reciclar el PET.

2.1. PROCESOS DE RECICLAJE DE PET

El reciclado consiste en un proceso mediante el cual los materiales que ya se utilizaron (desperdicios), como el PET, estos se acondicionan con la finalidad de integrarlos nuevamente a un ciclo productivo bajo la forma de materia prima. Para ello se tendrá en consideración tres formas básicas diferentes para lograr el aprovechamiento de los envases de PET después de haber concluido su vida útil: Reciclaje mecánico, químico, así como el energético. (Reyes, 2009)

2.1.1. Reciclaje mecánico

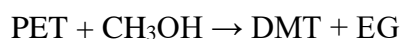
Mediante este procedimiento se acopian los plásticos de aquellos procesos de fabricación en la industria (petroquímica o transformadora). Dicho procesamiento de los materiales plásticos empleados radica en fragmentar el referido material con la finalidad de introducirlo luego en una máquina extrusora-granceadora. El referido material que se obtuvo, posteriormente se va a moldear a través de métodos tradicionales. Únicamente se podrá aplicar a los termoplásticos, referidos a aquellos que tienden a fundirse gracias a la acción de la temperatura. Esta clase de reciclado denota dos problemas primordialmente: en primer lugar, el plástico que ya fue utilizado tiende a perder algunas de sus propiedades, por tanto, obliga a utilizarlo en la fabricación de distintos tipos de productos que requieran de menores exigencias; otro de los problemas está referido a la dificultad que presenta para separar las diversas clasificaciones de plásticos. El proceso utilizado para el reciclado podría realizarse muchas veces, por ello debe tenerse en consideración que cada ocasión que se efectúa, el material presenta una tendencia a perder de

entre los 5 y 10% de las propiedades mecánicas que posee y que mediante el agregado de algunos aditivos podrían restituirse (Medina et al, 2011).

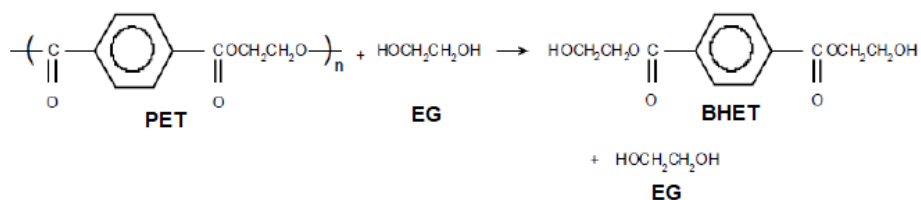
2.1.2. Reciclaje Químico

En la actualidad se vienen desarrollando tecnologías a escala industrial a favor del reciclaje químico, referida a la separación de los compuestos básicos de la resina, así como de la síntesis de ahorro de gas y del petróleo, las cuales constituyen las materias básicas del PET. Existe una diversidad procesos de reciclado químico, siendo los más importantes los mencionados a continuación (Herrera y Estrada, 2012):

Metanólisis: es realizada mediante un tratamiento del polímero con elevadas cantidades de metanol, ante un catalizador como el trisopróxido de aluminio o además como el acetato de zinc, así también las sales de ácido arilsulfúrico, este proceso se realiza en condiciones de presión, así como de temperaturas elevadas de entre 20-25 kg/cm² y 180-280°C, mediante un tiempo de 3 a 4 horas. a través de este proceso el PET se tiende a descomponer sus moléculas básicas, dimetil tereftalato (DMT), así como el etilenglicol (EG), las mismas que pueden nuevamente ser polimerizadas con la finalidad de obtener el polímero.



Glicólisis: está referida a una reacción de condensación inversa, la que utilizará etilenglicol (EG) en exceso, para provocar la degradación, y que obtendrá oligómeros de cadena corta, así como el bis-hidroxi etilen tereftalato (BHET). La glicólisis ha podido convertirse en uno de los procedimientos más viable en el reciclado químico, la bondad de este método radica en la baja inversión de capital, siendo diferente a la metanólisis, así como la hidrólisis, que requieren plantas de grandes capacidades para posibilitar su viabilidad.



Para efectuar el proceso debe mezclarse las escamas de PET reciclado con EG, así como también acetato de zinc como catalizador, a temperaturas que fluctúan entre 195 a 220°C y presiones normales. Se emplea el exceso de EG en la proporción de 6:1 y en una

correspondencia de catalizador/PET de 1% con un tiempo total de reacción de aproximadamente 3 horas. En la Figura 10 se muestra el diagrama de bloques de la glicólisis tradicional.

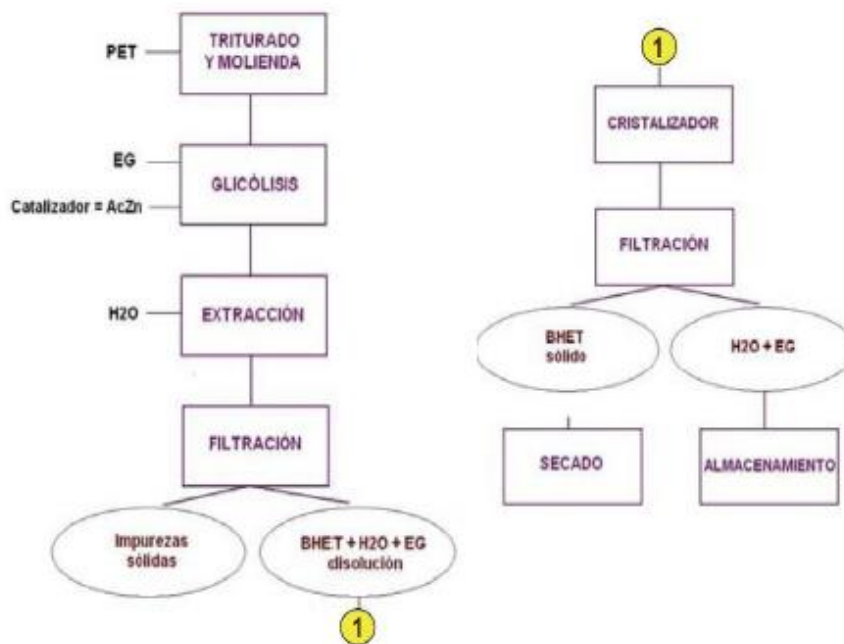
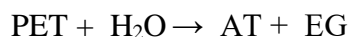


Figura 10: Diagrama de Bloques de la Glicólisis de PET reciclado

Nota: recuperado de Zamudio y Cuervo, 2013.

Hidrólisis: está referida a una reacción ácido-base entre una sustancia, básicamente una sal y el agua, el cual se usa a elevadas temperaturas, así como a presiones que permitan la obtención del ácido tereftálico (AT) y EG para que se pueda reutilizar en la elaboración de polímeros virgen. En este tipo de procedimientos los costos de purificación tienden a ser muy altos. Este procedimiento es clasificado a través de las siguientes categorías: hidrólisis alcalina, ácida y neutra.



Aminólisis: esta reacción es realizada con PET para que se formen las diaminas de AT y EG. Este proceso se realiza a través de una solución acuosa de aminas primarias como la metil-amina o etilamina a temperaturas que fluctúan de 20 hasta 100°C, así también es recomendable que el PET se presente en forma de polvo o en escamas. Los productos a obtenerse, podrían utilizarse como compuestos intermedios o monómeros para facilitar la producción de poliésteres de amina o poli ureas mediante algunas reacciones subsecuentes con isocianatos.

2.1.3. Reciclaje Energético

El PET por formarse de átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno, al quemarse producirá dióxido de carbono, así como agua, con desprendimiento de energía. Existe la posibilidad de que pueda aprovecharse este material como combustible en condiciones donde, por costos de acopio, así como de transporte no sea viable cualquier tipo de procedimiento de reciclado adicional, para calefacción de asilos, escuelas entre otras utilidades como la fabricación de ladrillos u otros. Un gramo de PET tiende a liberar energía entre 22075 BTU la que presentan otros combustibles que derivan del petróleo (Hachi y Rodríguez, 2010).

2.2. PROCESOS DE GLICOLISIS DEL PET

Existen cuatro métodos distintos de realizar la glicólisis de PET reciclado postconsumo:

Glicólisis asistida con solvente

Glicólisis supercrítica

Glicólisis asistida con microonda

Glicólisis catalizada

2.2.1. Glicólisis asistida con solvente

Este proceso comprende la degradación de PET por etilenglicol en la presencia de un solvente en el medio de reacción. Por ejemplo, si se utiliza xileno en la mezcla de reacción el rendimiento obtenido de BHET fue más alto en comparación cuando no se utiliza xileno. La mejora se debería a que el xileno mejora la solubilidad de la mezcla PET-etilenglicol. El principal inconveniente de este proceso es que los solventes orgánicos son peligrosos al medio ambiente y el uso masivo de estos solventes no es una idea muy atractiva (Yue et al., 2013).

2.2.2. Glicólisis supercrítica

La glicólisis supercrítica comprende la degradación del PET por etilenglicol a temperatura y presiones encima del punto crítico del etilenglicol. La principal ventaja de este proceso es la eliminación de la necesidad de catalizador, el cual es difícil de separar de los productos de la reacción. Es un proceso amigable con el medioambiente. El proceso se realiza a 450°C y 15.3 MPa, con lo cual se puede obtener un rendimiento mayor que 90% del monómero BHET. Empleando una relación en peso de PET /EG de cerca de 0.06 se logra un tiempo de reacción de 30 minutos (Imran et al., 2010). La desventaja del proceso incluye la alta temperatura y presión necesaria para realizar la reacción.

2.2.3. Glicólisis asistida con microonda

Más allá de los catalizadores ecológicos, Pingale y Shukla (2018) ampliaron su estudio al uso de fuentes de calentamiento no convencionales de radiaciones de microondas. El empleo de radiaciones de microondas como fuente de calentamiento disminuyó drásticamente el tiempo para completar la reacción de 8 ha solo 35 min. Sin embargo, no aumentó el rendimiento de monómero BHET. El uso de un catalizador más eficiente junto con el calentamiento por irradiación de microondas puede aumentar el rendimiento de BHET al tiempo que disminuye el tiempo de reacción. Bajo las mismas condiciones de concentración de catalizador (acetato de zinc) y la misma relación PET:EG, el rendimiento de BHET fue muy parecido, sin embargo, el tiempo para completar la reacción disminuyó drásticamente de 3 horas a solo 35 minutos, y por lo tanto hay un ahorro muy significativo de energía.

2.2.4 Glicólisis catalizada

La glucólisis sin catalizador es un proceso extremadamente lento. Ha habido un gran interés en el desarrollo de catalizadores de transesterificación altamente activos para la despolimerización de PET a BHET. El método más estudiado para aumentar la velocidad de glucólisis es la catálisis. La glucólisis de PET se considera una reacción de transesterificación. Por lo tanto, los catalizadores de transesterificación se han aplicado a fin de incrementar la velocidad presente en la reacción de la glucólisis de PET.

La velocidad de la reacción de glicólisis depende de varios factores: temperatura, presión, relación PET/EG y el tipo y cantidad de catalizador. La transformación de dímero a monómero BHET es un proceso reversible, de tal forma que prolongar la reacción después que se alcanzó el equilibrio es dar más posibilidad que se forme el dímero a expensas del monómero BHET.

2.2.4.1. Sales Metálicas

Los catalizadores más antiguos reportados para la glicólisis del PET son los acetatos de metal.

El acetato de zinc fue el primero utilizado en la síntesis de polioles a parte de PET reciclado.

Con el catalizador basado en metal, el metal facilita la formación de un complejo junto al grupo carbonilo, facilitando el ataque del EG hacia el PET, lo que conduce a la formación de BHET.

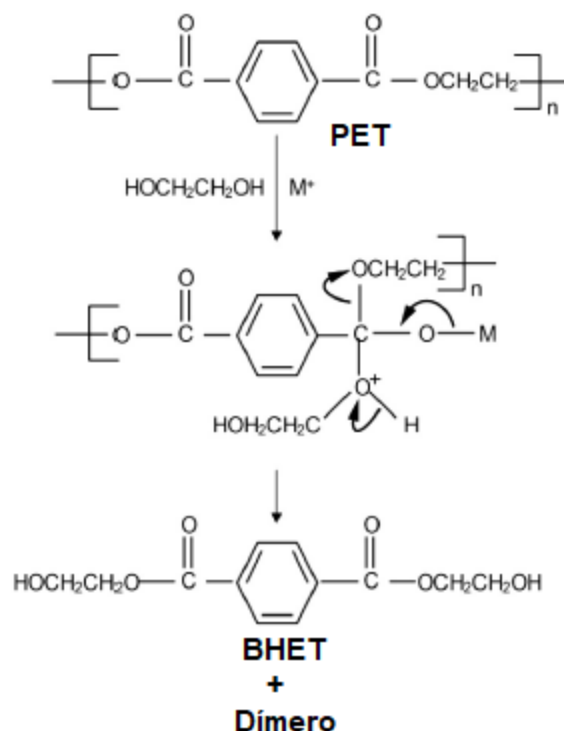


Figura 11: Mecanismo de reacción de glicólisis usando un catalizador metálico.

Nota: recuperado de Al-Sabagh et al., 2015.

Se han realizado pruebas con acetatos de diferentes metales y se ha demostrado que la actividad catalítica del $\text{Zn}^{+2} > \text{Mn}^{+2} > \text{Co}^{+2} > \text{Pb}^{+2}$. Se ha demostrado que con acetato de zinc el equilibrio se alcanza entre 3 a 8 horas, a una temperatura de 190°C . Se logra un producto con un contenido de BHET de 62.8%.

Con acetato de manganeso se ha logrado disminuir el tiempo de reacción a 1.5 horas empleando las mismas condiciones de glicólisis que el acetato de zinc, es decir, temperatura 196°C , relación EG/PET de 5, y relación en peso de catalizador/PET de 0.01.

Se ha empleado un nuevo catalizador en base a fosfato de titanio IV, y logro a través de un tiempo de 150 minutos, 200°C , relación de catalizador/PET de 0.003, un producto con 97.5% de BHET, mucho más alto que el catalizador tradicional de acetato de zinc.

También se ha probado con sales con menos efectos negativos para el medio ambiente. Entre estos tenemos carbonato de sodio y bicarbonato de sodio. Y el último de los catalizadores

metálicos probados ha sido del cloruro de zinc, el cual en condiciones normales ha logrado un rendimiento de 73.24%.

La actividad catalítica con estos catalizadores homogéneos es efectivamente muy alta en la glicólisis de PET. Sin embargo, tienen varios inconvenientes, como la característica que presenta el catalizador de no poder lograr la separación fácilmente de la mezcla de reacción porque la mayoría de estos catalizadores son solubles en etilenglicol; por lo tanto, se requiere una unidad de operación adicional (destilación) en el proceso químico. También se ha observado que las sales de zinc no aumentan la velocidad de glucólisis a temperaturas por encima de 245 ° C, lo que limita su uso a las temperaturas moderadamente altas aplicadas para disminuir el tiempo de reacción general, los catalizadores no pueden ser reciclados y reutilizados, la existencia de reacciones secundarias y la pureza de los productos.

2.2.4.2. Catalizadores heterogéneos

A fin de resolver el problema de separación del catalizador en las reacciones en fase homogénea vistos anteriormente se ha ensayado con distintos catalizadores en fase heterogénea. Se ha probado con Mn_3O_4 impregnado sobre nano partículas de silicio, a 300°C, 1.1 MPa, proporción molar EG a PET de 11:1 y proporción en peso de catalizador a PET de 1% durante 40-80 minutos, lográndose rendimientos mayores a 90%. El mismo autor probó con ZnMn_2O_4 en su forma tetragonal logrando rendimientos de 92.2% bajo condiciones de 260°C y 5.0 atm (Imran et al., 2013).

Otros investigadores han probado con un nanocomposito de óxido de manganeso y óxido de grafeno ($\text{GO-Mn}_3\text{O}_4$). También hidrocalcitas de Mg-Al y sus respectivos óxidos han sido probados con éxito para la glicólisis de PET. Últimamente, $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZnO}$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ y $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZnO-TiO}_2$ han probado alta actividad catalítica.

Lo común de los catalizadores en fase heterogénea es que permiten alcanzar altos rendimientos en BHET. Sin embargo, estos catalizadores requieren altas temperaturas y presiones, lo que lo hace aumentar los costos de reacción.

2.2.4.3. Líquidos iónicos

Un líquido iónico (LI) es una sal en estado líquido que tiene un punto de fusión más bajo que 100°C. El punto de fusión de los iones asimétricos grandes, cuya carga se puede distribuir en un gran volumen, es bajo y, por lo tanto, el punto de fusión de un LI puede estar muy por debajo de 0°C.

El uso de líquidos iónicos permite que la etapa de purificación sea más simple. Por ejemplo, Wang et al (2011) utilizó bromuro de 1-butil-3metil-imidazolio, y operando a 160 – 195°C, a presión atmosférica, durante 5-10 horas logro una conversión de 100% y una alta pureza del producto. Además, el catalizador separado puede volverse a utilizar.

2.2.4.4. Catalizadores volátiles: se utiliza un catalizador orgánico de bajo punto de ebullición, de tal manera que después que actúa en el reactor se puede separar por flasheo y volverlo a utilizar de cinco a diez veces. El rendimiento es cerca de 80% y por ser muy selectivo la pureza del producto BHET es mayor que 99%, de tal forma que puede alimentarse directamente al reactor de polimerización y obtener PET virgen. El referido proceso se puede resumir en la Figura 12.

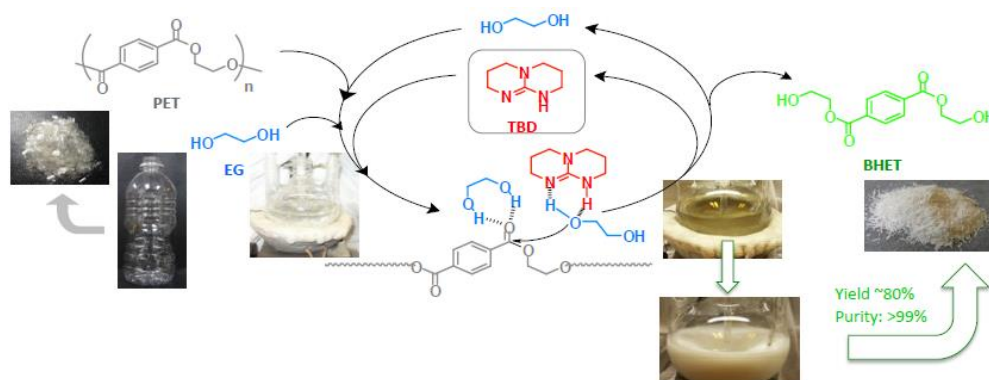


Figura 12: Depolimerización organocatalítica de PET reciclado de IBM.

Nota: recuperado de Fukushima et al., 2018.

El proceso permite tratar escamas de PET no muy puros y limpios a diferencia de los otros procesos que son muy exigentes. Incluso no debe separarse botellas de PET coloreadas de azul o verde. La razón de esto es la alta selectividad del catalizador, que solo ataca al PET. Esto últimos

se conoce como “selección molecular”. Además, todos los reactivos químicos se recuperan y virtualmente no hay ningún desperdicio. El catalizador, triaza ciclodeceno (TBD), es de bajo costo, es fácilmente recuperable y biodegradable.

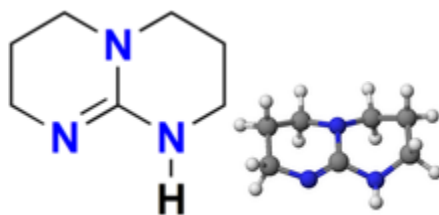


Figura 13: Molécula de TBD

El nombre completo del catalizador es 1,5,7-triazabicyclo [4,4,0]-5-deceno. Es un catalizador conocido para una variedad de reacciones y se conoce como el catalizador más activo para romper anillos de polimerización como los tiene el PET. Se activa muy fácilmente tanto en alcohol como en el monómero del PET gracias a que forma fácilmente enlaces de hidrogeno (Fukushima et al., 2018).

2.3. SELECCIÓN DEL PROCESO DE GLICOLISIS

De los distintos procesos de glicolisis los más utilizados a nivel comercial son la glicólisis catalizada. Los otros procesos, como la glicólisis asistida con solvente es altamente contaminante por la presencia de solventes orgánicos; la glicólisis supercrítica requiere temperaturas y presiones muy elevadas, y la glicólisis asistida con microonda requiere acetato de zinc que es difícil de separar de la mezcla reactiva.

Siendo la glicólisis catalizada la más utilizada pasamos a resumir las ventajas y desventajas de cada una de ellas:

Catalizada con sales metálicas: tecnología usada actualmente, altos rendimientos, condiciones moderadas de temperatura y presión, pero la separación del catalizador es muy costosa. Los catalizadores metálicos no son biodegradables.

Catalizadores heterogéneos: alto rendimiento, fácil separación del producto, pero temperatura y presiones muy elevadas.

Líquidos iónicos: es la mejor alternativa de las sales metálicas, se logra rendimientos semejantes, se puede separar fácilmente del producto, pero solo se puede reutilizar tres a cuatro veces.

Catalizadores volátiles: es un proceso muy sencillo, temperatura y presión moderada, alto rendimiento y alta selectividad que permite obtener BHET de muy alta pureza, listo para polimerizarse a PET virgen.

Por las razones expuestas se selecciona la glicólisis con catalizador volátil, cuya patente industrial lo tiene la compañía IBM Corp., Armonk, New York.

2.4. DESCRIPCION DETALLADA DEL PROCESO

El proceso consiste de dos secciones: el reciclado mecánico y la sección de glicólisis con solvente volátil.

A pesar que el proceso de glicólisis seleccionado permite trabajar con escamas de PET reciclado contaminado con suciedad, otros tipos de plásticos e incluso con PET reciclado de color, en el presente proyecto se ha considerado separar las impurezas en la etapa de reciclaje mecánico, de tal forma que al proceso de glicólisis se ingresará las escamas de PET con una mayor pureza.

2.4.1. Reciclaje mecánico

Antes del reciclado químico se experimenta un reciclado mecánico, debido a que en esta fase se pueden obtener las escamas, sus dimensiones podrían presentar una variación de entre 2 y 10 mm. La dimensión de la partícula presenta influencia sobre el área de contacto, una granulometría más fina constituye una baja en el tiempo que dura el proceso, para lo cual ocurre un incremento en la velocidad de dicha reacción.

El proceso consiste en que pueda identificarse y clasificarse el material, en el cual va a involucrar al lavado, la separación de las etiquetas, el triturado, así como el lavado final. Teniendo las escamas limpias se somete a secado con centrifuga o con aire caliente, quedando lista para la glicólisis. El proceso de reciclaje mecánico se ilustra a través del diagrama de bloques representado en la Figura 14. Para que se produzca 1 kg de escamas de PET reciclado de alta pureza se necesita 1.25 kg de PET reciclado.

2.4.2. Glicólisis con catalizador volátil

El proceso se describe en base a la Figura 14. El proceso conocido como VolCat (volatile catalyst). El PET previamente en purificado en forma de espumas es alimentado al reactor junto con etilenglicol y el catalizador. El reactor opera a 190°C y a presión atmosférica. El catalizador digiere limpia el bloque de plástico reciclado, y va separando los contaminantes, produciendo el BHET. La alta especificidad del catalizador hace que en no más de 10 minutos todo el PET ha sido transformado en BHET, y se produce muchas impurezas que contiene los polímeros como el PET comercial. La mezcla líquida obtenida se envía a un filtro para separar dichas impurezas. Se debe usar un exceso de EG para evitar la producción de un dímero o un trímero de BHET. Durante el proceso, el catalizador por ser volátil va saliendo del reactor con algo de agua presente en el PET reciclado y por lo tanto tiene que ser separado y reciclado al reactor. El filtrado, en caso se haya utilizado PET de colores pasa primero por una columna de carbón activado para separar el material colorante. Antes de filtrar hay que enfriar la mezcla que sale del reactor a 80°C. Inmediatamente el líquido que contiene un sinnúmero de aditivos en forma de sales metálicas, es purificado en dos columnas en serie de intercambio catiónico y aniónico. Se recomienda Amberlyst 15. El líquido purificado y con solo BHET y EG se envía a un cristizador para producir BHET bajo la forma de polvo presnetando una pureza de 99.9%.

La reacción de despolimerización por glicólisis del PET reciclado:

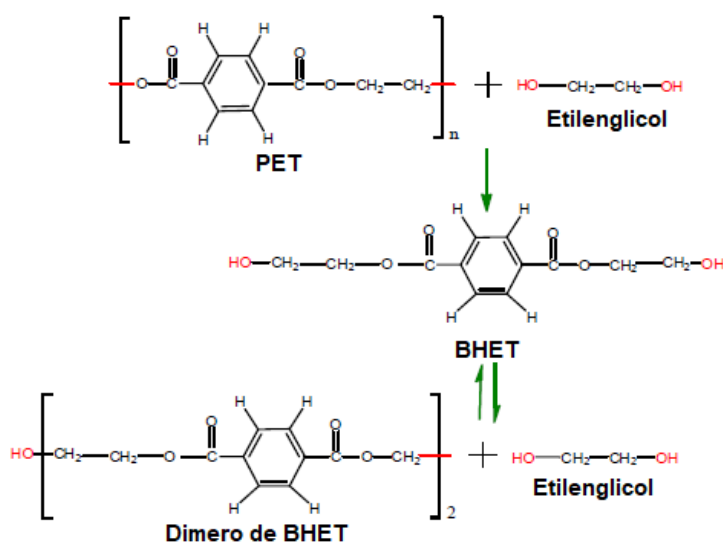
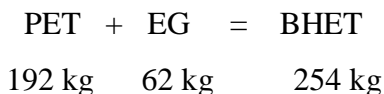


Figura 14: Reacción de despolimerización por glicólisis del PET reciclado.

Por lo tanto, es recomendable mantener la reacción lejos del equilibrio utilizando exceso de etilenglicol. Estequiométricamente, por cada molécula de PET se utiliza una molécula de etilenglicol para producir una molécula de BHET. En resumen



Una unidad del PET tiene 192 kg por kmol (Capeletti et al., 2016). La relación molar más recomendable es 16:1 de etilenglicol (EG) respecto a la cantidad de PET alimentado. La cantidad de catalizador en relación molar es 0.1:1 de TBD en relación al PET alimentado.

En un reactor CSTR con calentamiento a 190°C, el tiempo total para terminar la reacción es 10 minutos. Inicialmente se forma una mezcla pastosa y transcurrido los 8 minutos este lodo se transforma en un líquido homogéneo y claro.

El rendimiento de todo el proceso es 80% obteniéndose un producto que presenta un elevado índice de pureza (> 99%).

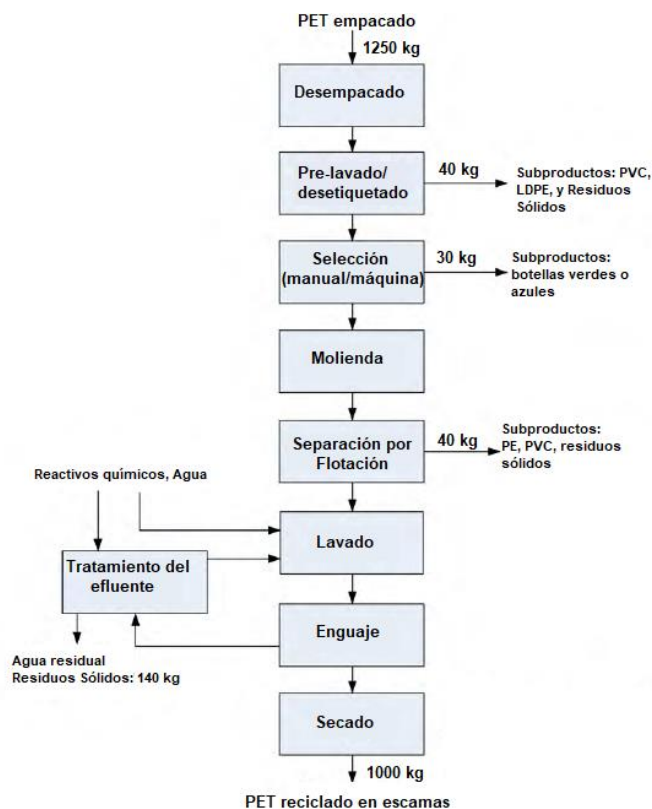


Figura 15: Reciclaje Mecánico del PET reciclado

Nota: Recuperado de Shen et al., 2010.

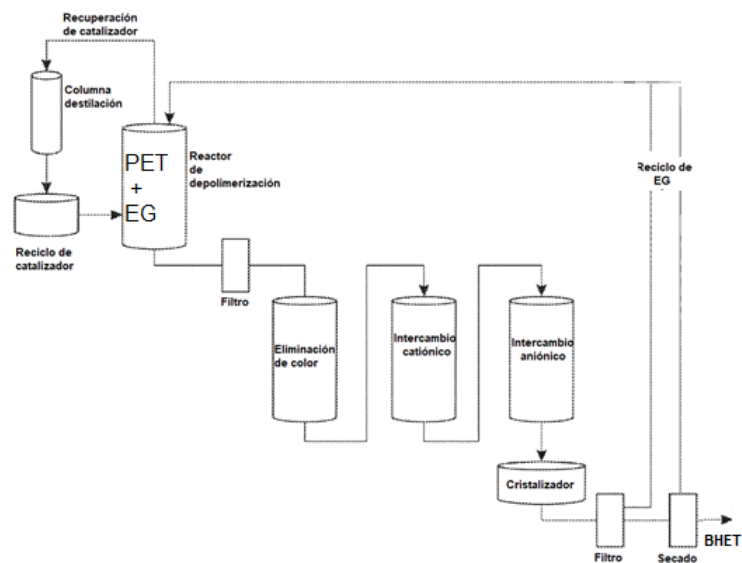


Figura 16: Glicólisis de PET reciclado con solvente volátil.

Nota: recuperado de Fukushima et al., 2018

2.5. BALANCE DE MASA Y ENERGIA

El balance realizado a la masa, así como a la energía se realizó teniendo en consideración al diagrama de bloques de la Figura 18. Según los cálculos mostrados en el Apéndice se necesita 5259.857 kg/hr de PET reciclado para producir 5000 kg/hr de BHET, es decir 1.052 kg de PET reciclado por kg de BHET. Los resultados del balance de masa se presentan en la Tabla 4.

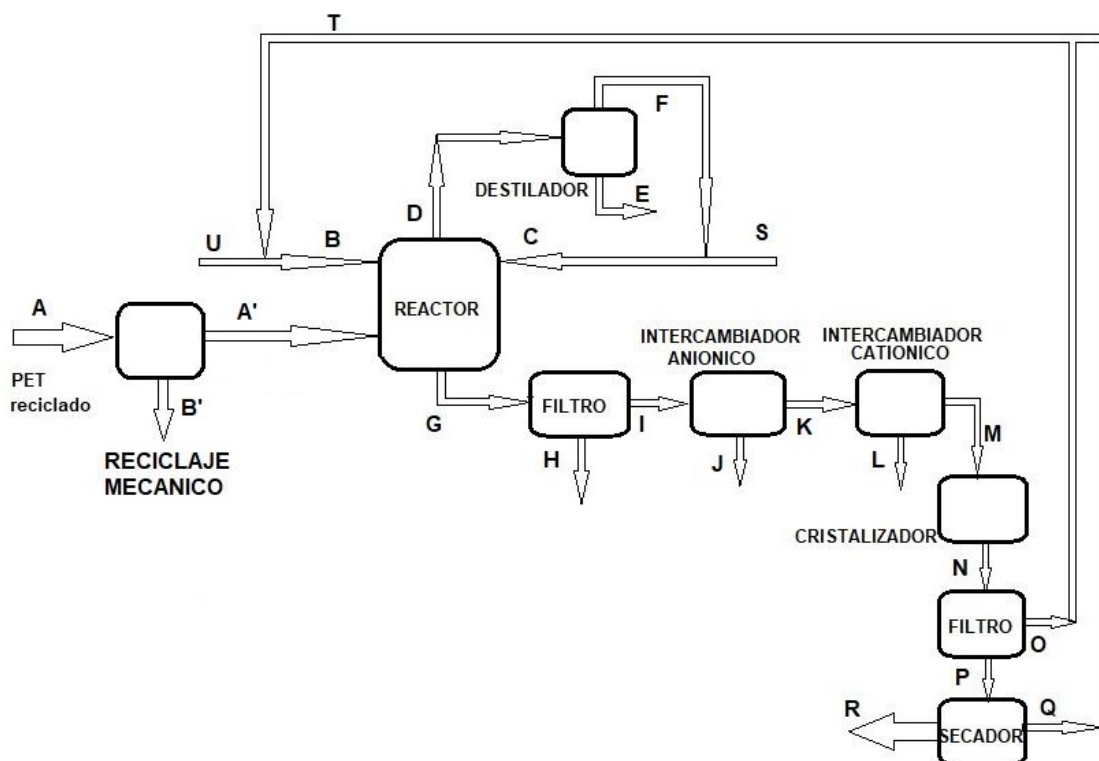


Figura 17: Diagrama de flujo del proceso de obtención de BHET a partir de PET reciclado.

Fuente: Elaborado por los autores

Consumo de energía: Se resume los consumos de energía en los principales equipos:

Planta de reciclaje mecánico del PET

Potencia instalada (electricidad): 900 kW

Vapor: 2300 kg/hr

Planta de reciclaje químico

Reactor: 3191.922 kg/hr vapor 1.7 MPa, 210°C

Secador: 397.975 kg/hr vapor 1.7 MPa, 210°C

Tabla 4

Balance de masa del proceso de obtención BHET a partir de PET reciclado.

	A	A'	B'	B	C	D	E	F	G	H	I	J
RESIDUOS	1051.971		1051.971									
PET Q.P.	3787.097	3787.097										
AGUA	126.237	126.237				126.237	126.237					
EG				19567.93					18345.014	18.345	18326.669	9.163
TBD					276.079	276.079	0.552	275.527				
RELL	252.473	252.473							252.473	252.473		
CAT	21.039	21.039							21.039		21.039	
ANI	21.039	21.039							21.039		21.039	21.039
BHET									5010.014	5.01	5005.004	2.503
TOTAL	5259.857	4207.886	1051.971	19567.93	276.079	402.316	126.789	275.527	23649.579	275.828	23373.751	32.705

FUENTE: Elaborado por los autores.

	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
TBD									0.552		
EG	18317.505	9.159	18308.347	18308.347	17392.929	915.417	915.417			18308.347	1259.584
CAT	21.039	21.039									
ANI											
BHET	5002.501	2.501	5000	5000		5000		5000			
TOTAL	23341.046	32.699	23308.347	23308.347		5915.417	915.417	5000	0.552	18308.347	1259.584

2.6. DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS DE PROCESO

La descripción de los equipos de proceso se base a los diagramas de flujo de las Figuras 4.4 y 4.5. La producción anual es 40000 ton por año de BHET, lo cual significa 5000 kg/hr de producto. La selección detallada se presenta en el Apéndice.

2.6.1. PLANTA DE RECICLAJE MECANICO

Función: obtención de escamas de PET limpias, tamaño de 1 mm

Capacidad requerida: 5259.857 kg/hr de PET reciclado

Capacidad nominal: 6000 kg/hr

Fabricante: Boretech (<https://www.bo-re-tech.com/en/index.html>)

Modelo: TL 6000, semiautomática

Potencia instalada: 900 kW

Área requerida: 1200 m²

Mano de obra: 30

Consumo de vapor: 2300 kg/hr

Aire comprimido: 1 m³/hr

Consumo de agua: 9 m³/hr (utilizando un sistema de reciclo)

Otros parámetros: ver Apéndice.

2.6.2. REACTOR

Función: realizar la reacción de glicolisis del PET con catalizador volátil

Tipo: CSTR

Volumen de trabajo: 3.5 m³

Volumen del reactor: 5 m³

Diámetro del reactor: 1.698 m

Altura: 2.207 m

Agitador: tipo Rushton

Diámetro de turbina: 0.566 m

Velocidad: 100 rpm

Motor: 2.165 kW

Chaqueta de calentamiento

Área: 24.006 m²

Tubería externa: 50 mm de diámetro

Longitud total requerida: 127.016 m

Numero de vueltas: 24

2.6.3. FILTRO

Función: separar la porción de material de relleno que tiene el PET comercial

Tipo: de cartucho

Modelo: DCF 2000

Fabricante: Ronningen – Petter®

Dimensiones:

Capacidad volumétrica total: 41.6 litros

Superficie de filtración: 610 pulg²

Rango de flujo: 30 – 200 gpm

Temperatura máxima de operación: 82°C

Presión de operación: 150 psi

Aire para operar el actuador: 5 pies³/min, 80 psi

2.6.4. INTERCAMBIADOR CATIONICO

Función: separar cationes presentes en el PET reciclado

Resina: Amberlite IR120 Na

Dimensiones del intercambiador:

Altura total: 1.40 m

Altura de resina: 1.2 m

Diámetro: 0.247 m

Peso de resina: 38.419 kg

2.6.5. INTERCAMBIADOR ANIONICO

Función: separar cationes presentes en el PET reciclado

Resina: Amberlite IRA402 Cl

Dimensiones del intercambiador:

Altura total: 1.40 m

Altura de resina: 1.2 m

Diámetro: 0.251 m

Peso de resina: 33.089 kg

2.6.6. CRISTALIZADOR-ENFRIADOR

Función: cristalizar el BHET formado por enfriamiento

Marca: BMA

Volumen requerido: 4.05 m³

Volumen nominal de fabricante: 5.0 m³

Diámetro: 2.0 m

Altura total, máximo: 6.0 m

Superficie de enfriamiento: 21 m²

2.6.7. FILTRO DE BHET SOLIDO

Función: separar el producto (BHET) del etilenglicol

Tipo: filtro prensa automatizado

Fabricante: Diemme S.p.A.

Modelo: 1000

Dimensiones:

Tamaño de placa: 1000 mm x 1000 mm

Presión de trabajo: 15 bar

Platos instalados: 25

Volumen de torta requerido: 378.842 litros

Volumen de torta nominal: 475 litros

Área de filtración: 37 m²

Longitud: 7200 mm

2.6.8. SECADOR

Función: separar el etilenglicol (EG) del BHET

Tipo: plano tipo cadena

Modelo: LPH120

Capacidad requerida: 120 ton/día de BHET sólido

Capacidad nominal: 150 ton/día

Reducción de EG requerido: 15.5%

Reducción de EG nominal: 18% con vapor, 20% con aceite de calentamiento

Dimensiones:

Área de calentamiento: 120 m²

Velocidad lineal del transportador plano: 15 a 100 mm/s

Altura de cada capa: 40 a 100 mm

Número de capas: 8 a 14

Potencia del motor: 5.5 kW

2.7. CONSIDERACIONES AMBIENTALES

El proceso de reciclaje del PET se viene perfilando como parte elemental del boom ambiental en la actualidad y, con esto, estaría convirtiéndose en la más grande oportunidad de negocio en la industria del plástico.

Una investigación reciente de la Agencia de Protección Ambiental ubicada en los Estados Unidos (USEPA) afirma que el reciclaje va a ser muy beneficioso, teniendo en consideración los parámetros de energía, así como del carbono. El reciclado del PET va a reducir de manera muy significativa la huella de carbono del empaque en condiciones de energía requerida, así como de las emisiones de gases que tienen efecto invernadero.

El proceso del reciclado significa una de las más grandes opciones de éxito ambiental del siglo XXI. Entre los beneficios del reciclado tenemos a: la conservación de recursos, se puede reducir los contaminantes, ahorro de energía, creación de trabajos, así como la mínima necesidad de rellenos sanitarios e incineradores

Los beneficios de reciclar no solo son ambientales sino también económicos y sociales. Permite crear una industria de reciclaje con trabajo para miles de recicladores y para ganancias de las empresas recicladoras (Ortega, 2017).

La principal ventaja del reciclaje químico con recuperación total del catalizador es la obtención de BHET de alta pureza con la cual se puede producir otra vez PET grado botella, situación que no se puede realizar con solo reciclaje mecánico que permite obtener PET para otros usos.

Respecto a los efluentes del proceso del presente proyecto se distinguen dos zonas. La primera en la etapa de reciclaje mecánico se obtiene principalmente residuos sólidos que se deben disponer como desecho industrial. En esta misma etapa el agua de lavado tiene un efecto contaminante mínimo porque se contempla un sistema de tratamiento, después del cual es reciclado para reutilizarlo. En la segunda etapa, glicolisis de PET reciclado los efluentes sólidos del filtro, columna decoloradora y las columnas de intercambio iónico son flujos muy bajos debido a que la mayor cantidad de impurezas han sido eliminadas en la etapa de reciclaje mecánico. En la etapa de reacción y en filtro de producto y secador existe recuperación total de catalizador y diluyente (EG), ambos volviéndose a reciclar y por lo tanto, se trabaja en circuito cerrado sin afectar al medioambiente.

CAPITULO III

ESTUDIO ECONOMICO FINANCIERO

En este capítulo se muestra en detalle el Balance Económico del proyecto y se presentan los principales indicadores que demuestran la posibilidad económica de este.

Al realizarse la evaluación económica de la presente investigación está en concordancia a la dinámica que siguen muchos de los proyectos de Plantas de procesos en la industria química. Por lo que se ha tenido en consideración dos aspectos de mucha importancia como la estimación de la inversión total, así como la estimación del costo total de la producción, a fin de que se pueda determinar la rentabilidad del proyecto.

A fin de realizar las estimaciones se ha tenido que utilizar los índices de Peters & Timmerhaus modificados para ser aplicados a la realidad peruana. Los costos han sido obtenidos de Matches, empresa de ingeniería licenciada y que tiene como uno de sus servicios proporcionar estimados de costos de equipos de proceso y hasta el 2014 tiene actualizado los costos de más de 275 equipos utilizados en la industria química. La actualización para el 2019 se realizó empleando los CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index) publicados en la revista Chemical Engineering.

3.1. ESTIMACIÓN DE INVERSIÓN TOTAL

La inversión total se representa como el capital necesario a fin de poder ejecutar el proyecto estimándose en \$ 11'978,190 dólares.

La inversión total se constituye por el capital fijo total que supera los \$10'628,982; así como un capital de trabajo u operación, la cual se ha estimado en \$ 1'349,208.

3.1.1. CAPITAL FIJO TOTAL

COSTO FIJO

El costo fijo es de \$ 10'628,982 conformándose por la suma de los costos directos, así como de los costos indirectos de la planta.

3.1.1.1. COSTO DIRECTO O FÍSICO

El costo directo es \$8'643,348 constituyéndose por el costo total de: el equipo de proceso instalado, de instrumentación, de tuberías y accesorios, de instalaciones eléctricas, de edificios, de terreno y mejoras, así como de servicios

3.1.1.2. COSTOS INDIRECTOS

El costo indirecto es \$1'985,634 y se constituye por el costo de: ingeniería y supervisión, de construcción, de seguros e impuestos de la construcción, de honorarios para contratistas así como los imprevistos.

Posteriormente se detallarán los costos directos, así como los indirectos:

A. COSTO DE EQUIPO PRINCIPAL Y AUXILIAR DE PROCESO

La estimación efectuada del costo de los equipos es realizada sobre la base de: Capacidad, características de diseño, tipo de material e información disponible sobre precios de los equipos para el año 2014 teniendo en consideración a Matches y a la vez se ha podido actualizar para el 2019 incluyendo los índices CEPCI.

El costo CIF del equipo principal, así como del auxiliar efectuada a los precios del año 2019 es mayor a \$3'210,000 dólares, y puesto en planta supera los \$3'306,300 dólares. Teniendo en cuenta este último valor, así como al utilizar los índices de Peter & Timmerhaus puede obtenerse los distintos valores que permitan calcular la inversión total del proyecto, que puede resumirse en la Tabla 5.1.

B. COSTO DE INSTALACION DE TODOS LOS EQUIPOS:

Para los dos módulos principales, módulo de reciclaje mecánico y módulo de reciclaje química, es considerado el 8% del costo que representa el equipo colocado en la planta, por lo que sería de \$ 467208

C. INSTRUMENTACION Y CONTROL

Esta línea se ha estimado teniendo en consideración los costos unitarios de los principales equipos que van a utilizarse en automatización de la planta. Todos los equipos cuentan con su particular sistema de control. La planta es semi-automatizada. Se tiene en consideración el 4% del precio del equipo total. El precio sería de \$233604

D. TUBERIAS Y ACCESORIOS

La estimación de los costos se ha realizado teniendo en consideración las dimensiones, así como el material de construcción, incluyendo el costo de compra, así como de instalación. Los módulos contienen sus conexiones. 8% del precio del equipo total. Llega a \$ 467208

E. INSTALACIONES ELECTRICAS

Se ha estimado teniendo en cuenta las recomendaciones dadas por P & T., siendo representadas por el 4 % del precio de compra total del equipo, obteniéndose un valor de \$ 233604.

F. ESTRUCTURAS DE LA PLANTA

El costo de estructuras contiene los costos de cimentación para el área de proceso a costos locales. Considerándose el 5% del costo del equipo total. El precio supera los \$ 292005.

G. TERRENOS Y MEJORAS

El precio del terreno ha sido estimado teniendo en consideración el lugar, así como la ubicación de la planta, comprende los precios de: preparación del terreno, asfaltado, veredas, sardineles, así como también del cercado de la planta, siendo este del 4% del costo del equipo total. El costo considerado es de solo \$ 233,604.

H. SERVICIOS

Aquí se consideran los gastos de instalaciones de agua, vapor, aire comprimido. Para este caso el gasto es mínimo debido a que no existe el servicio de vapor. Se ha evaluado como el 15% del precio del equipo total. El precio es de \$ 876015

COSTOS DIRECTOS TOTALES

Es considerado como la suma del precio del equipo de la planta, adicionalmente a los costos de instalación, control e instrumentación, tubería, así como de los accesorios, sistema eléctrico, edificios, mejora de terrenos, servicios. Alcanzando un valor de \$ 8'643,348.

A.INGENIERIA Y SUPERVISION

Teniendo en consideración que es un sistema modular, se va a considerar el 8% del precio total de la planta colocado en el lugar seleccionado. El valor supera a los \$ 46708.

B.COSTO DE LA CONSTRUCCION

Se considera 15% del costo total de la planta. Ascende a \$ 876015.

C. COSTO DE SEGUROS E IMPUESTOS DE LA CONSTRUCCION:

Se considera solo el 2% del costo del todo el equipo. Ascende a \$ 116802.

D. HONORARIOS PARA CONTRATISTAS

Esta línea considera el 5% del precio físico de la planta, \$ 292005.

E. IMPREVISTO

Se va a considerar \$ 233604 con la intencionalidad de solucionar cualquier situación imprevista que represente el gasto y por tanto, que no se haya podido considerar bajo lo parámetros del costo de construcción de la planta, estimándose el 4% del costo total de la planta.

COSTOS INDIRECTOS TOTALES

Viene a ser la sumatoria de los costos de ingeniería, así como de supervisión, gastos de construcción, seguros e impuestos, honorarios para contratistas, además los gastos imprevistos. Llegando a alcanzar la suma de \$ 1'985,643.

INVERSION DE CAPITAL FIJO

Se representa como la sumatoria de los costos directos totales, así como los costos indirectos totales. Llegando a la totalidad de \$ 10'628,982.

3.1.2. CAPITAL DE PUESTA EN MARCHA O CAPITAL DE TRABAJO

El presente rubro comprende los egresos realizados para efectuar pruebas, así como los ajustes del equipo del proceso antes de realizar la operación comercial de la planta. Siendo el período de puesta en marcha debe considerarse que no debe exceder a un mes. Se tuvo que efectuar un cálculo de un capital de \$ 1'349,208.

Se ha tenido en consideración que debe procesarse en forma continua, en 3 turnos de 24 horas, en el transcurso de 8000 horas al año.

Inventario de materia prima: se ha considerado una semana de materia a los costos de puesto en planta. Llegando a alcanzar la suma de \$ 414208

Inventario de materia en proceso: aquí se va a considerar un día de operación. Promediándose los \$ 60000.

Inventario de producto en almacén: el producto se pondrá a la venta en el mercado de la región Lima, por tal razón solo se debe considerar precio para el transcurso de una semana de producción. El valor que ha logrado alcanzar es \$ 277778.

Cuentas por cobrar: tiene una equivalencia a 30 días de ventas, si tenemos en consideración los motivos expuestos en el ítem anterior llega a \$ 388889.

Disponibilidad en caja: es utilizada para efectuar los pagos de salarios, suministros y algunos imprevistos. Se tiene en consideración 30 días de producción. Llega a \$ 208333.

LA INVERSION TOTAL: representa la suma de capital fijo adicionalmente al capital de trabajo, para poder alcanzar el valor de \$ 11'978,190.

Tabla 5:

Inversión total del Proyecto.

ACTIVOS FIJOS			
I. Costos directos			
Costo de equipos en planta	\$5'840,100		
Costos de instalación	\$467208		
Costo de instrumentación y control	\$233604		
Costo de tuberías y accesorios	\$467208		
Costo de sistema eléctrico	\$233604		
Costo de estructuras de la planta	\$292005	\$8'643,348	
Costo de terrenos y mejoras	\$233604		
Costo de servicios	\$876015		
	Total costos directos		
II. Costos indirectos			
Costos de ingeniería y supervisión	\$467208		
Costo de la construcción	\$876015		
Costos de seguros e impuestos a la construcción	\$116802	\$1'985,634	
Costo de honorarios para los contratistas	\$292005		\$10'628,982
Costo de imprevistos	\$233604		
	Total costos indirectos		
CAPITAL DE TRABAJO			
Inventario de materia prima	\$41208		
Inventario de materia prima en proceso	\$60000		
Inventario de producto en almacén	\$277778		
Cuentas por cobrar	\$388889		\$1'349,208
Disponibilidad de caja	\$208333		
	Total capital de trabajo		
INVERSIÓN TOTAL DE PROYECTO			\$11,978,190

Fuente: elaboración propia

3.1.3. ESTIMACION DEL COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN

El precio total de la fabricación se ha conformado por el precio de manufactura, así como de los gastos generales. Siendo el precio total por año de \$ 22'077,912. La estimación del precio de producción, así como del costo unitario se detalla en la Tabla 6.

3.1.3.1. COSTO DE MANUFACTURA

Esta línea incluye los costos: directo de manufactura, indirectos, así como los fijos, tal como se detalla a continuación:

A. COSTO DIRECTO DE MANUFACTURA

Se constituye por los costos de la materia prima, mano de obra, supervisión, mantenimiento, así como de la reparación de la planta, suministros para las operaciones, así como los servicios auxiliares, llegando a los \$ 20'441,147.

MATERIA PRIMA

La materia prima que va a utilizarse para realizar la producción de producto considera los costos del concentrado de PET reciclado empacado, etilenglicol, catalizador volátil (TBD), resina catiónica, resina aniónica. Para la capacidad que se ha diseñado el costo total supera los \$ 19'882,005.

MANO DE OBRA

Para operar la planta se necesita de 12 trabajadores por turno de 8 horas. Esta cantidad de operarios se ha logrado estimar a través del método Wessel, basado en la cantidad de las fases primordiales del proceso, capacidad de producción, así como del grado de automatización.

El costo por de mano de obra establecido anualmente supera los \$ 226800.

SUPERVISION E INGENIERIA

A través de esta línea se ha tenido en consideración a todos los trabajadores comprometidos con la supervisión directa de las operaciones de producción de las diversas instalaciones, siendo el 20% del costo de la mano de obra representado por \$ 45360.

MANTENIMIENTO Y REPARACIONES

Aquí se consideran los gastos requeridos para conservar la planta en óptimas condiciones de operación, así como también se ha estimado el 2% del capital fijo representado por \$ 212580.

AUXILIARES Y SERVICIOS

Aquí se van a considerar los gastos por conceptos de lubricantes, pintura, materiales de limpieza, agua, energía eléctrica, entre otros, para su estimación se ha tenido que considerar el 15% del costo anual de mantenimiento, siendo una totalidad de \$ 31887.

SUMINISTROS DE OPERACIÓN: 20% del costo de mantenimiento supera los \$ 42516.

B. COSTOS INDIRECTOS DE FABRICACIÓN

Aquí se consideran los gastos de laboratorio, cargas a la planilla, así como los gastos generales de la planta. Llegando a \$ 115668.

CARGAS A LA PLANILLA

Aquí se consideran todos los gastos correspondientes a beneficios sociales. Se ha tenido en cuenta el 21%. de la suma de los Costos de mano de obra, así como de supervisión. Llegando a \$ 47628.

LABORATORIO

Constituye a los costos de las pruebas de laboratorio que se realizan para el control de las operaciones, así como el control de calidad del producto, adicionalmente el de las remuneraciones por supervisión.

Costo: 20% del costo asignado a la mano de obra. Llega a \$ 45360.

GASTOS GENERALES DE LA PLANTA

Está conformado por los gastos asignados para satisfacer servicios, tales como: asistencia médica, protección de la planta, limpieza, vigilancia, servicios recreacionales, entre otros.

Se ha realizado la estimación del 10% del costo asignado a mano de obra. Llegando a \$ 22 680.

C. COSTOS FIJOS DE FABRICACION

Los costos fijos establecidos no son dependientes del volumen de producción de la planta, se han formado por la depreciación, impuestos, así como los seguros. El total llega a \$ 1'275,478.

DEPRECIACIÓN

El capital asignado sujeto a depreciación está representado por el capital fijo total excluyendo el costo asignado al terreno. Para poder establecerlo se ha tenido en consideración el 10% del capital fijo \$ 1'062,898.

IMPUESTOS

El pago de impuestos asignados a la propiedad para zonas que no son muy pobladas se ha considerado el 1% del capital fijo total, \$ 106 290.

SEGUROS

Se ha tenido en consideración el 1% del capital fijo total, \$ 106 290.

3.1.3.2. GASTOS GENERALES (VAI)

Aquí se consideran los gastos efectuados por concepto de: administración, ventas, así como de distribución, investigación, así como desarrollo. Llegando a \$245 619.

a. VENTAS

Comprende los costos en oficinas de ventas, personal de ventas, propaganda, distribución. Se ha considerado el 10% del costo fijo de fabricación. Llegando a \$ 127 548.

b. ADMINISTRACION

Aquí se consideran los gastos efectuados por derecho de salarios de funcionarios, contadores, secretarias, así también los gastos de gerencia de actividades administrativas. Se ha logrado

estimar como el 15% del costo asignado a la mano de obra, supervisión, así como de mantenimiento. Llega a \$ 72 711.

c. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Esta línea está encaminada a lograr la mejora de la calidad, proceso y en términos generales para abaratar los costos de producción. Estimándose el 20% como la mano de obra, \$45360.

3.1.3.3. COSTO TOTAL DE FABRICACION:

Este costo se considera igual a la suma del costo de fabricación, así como los gastos generales (VAI). Llegando a \$22'077,912.

3.1.3.4. COSTO UNITARIO:

La producción anual se considera llegar a los 40'000,000 kg., por consiguiente, el costo unitario es el costo fijo total considerado entre la producción anual, el costo unitario llega a 0.5519 dol/kg.

Tabla 6:

Costo de Manufactura y Costo Unitario

COSTOS DE MANUFACTURA			
1.COSTOS DIRECTOS DE MANUFACTURA			
Costos de materia prima	\$19'882,005		
Costo de mano de obra	\$226800		
Costo de supervisión e ingeniería	\$45360		
Costo de mantenimiento y reparación	\$212580	\$20'441,147	
Costo de auxiliares y servicios	\$31887		
Costo de suministros de operación	\$42516		
TOTAL COSTOS DIRECTOS			
2.COSTOS INDIRECTOS DE MANUFACTURA			
Costos de planillas	\$47628		
Costo de laboratorio	\$45360	\$115668	
Costos generales de planta	\$22680		
TOTAL COSTOS INDIRECTOS			
3.COSTOS FIJOS DE MANUFACTURA			
Depreciación	\$1'062,898		
Impuestos	\$106290	\$1'275,478	
Seguros	\$106290		
TOTAL DE COSTOS FIJOS			
4.GASTOS GENERALES			
Ventas	\$127548		
Administración	\$72711	\$245,619	
Investigación y desarrollo	\$45360		
TOTAL GASTOS GENERALES			
COSTO TOTAL DE MANUFACTURA		\$22'077,912	
5.COSTO UNITARIO			
Producción: 40'000,000 kg.		\$0.5519/kg	

FUENTE: Elaboración propia

3.1.4. BALANCE ECONÓMICO Y RENTABILIDAD

Considerando el análisis realizado a la rentabilidad del proyecto se tuvo en consideración el precio de venta colocado en la fábrica de 0.75 dol/kg

3.1.4.1. RETORNO SOBRE LA INVERSION

Antes de Impuesto

Se formula como la relación porcentual entre las utilidades antes de impuestos, así como de la inversión total.

El regreso sobre la inversión antes de los impuestos obtenidos es de 60.42%, lo que nos demostraría la posibilidad económica del proyecto

Después del Impuesto.

Se representa como la relación porcentual existente entre las utilidades después de impuestos, así como de la inversión total.

El regreso sobre la inversión posterior a la de los impuestos obtenidos es de 43.01%, demostrando una vez más la factibilidad económica del proyecto (Ver Apéndice).

A. TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Aquí se considera al tiempo expresado en años, mediante el cual va a recuperarse la inversión de capital fijo, operando tres turnos de 8 horas, durante 300 días al año.

El tiempo de repago antes de impuestos bien a ser de 1.33 años y posterior a la de los impuestos es de 1.67 años.

B. PUNTO DE EQUILIBRIO

Este es considerado al nivel de producción, a través del que no se obtiene ni pérdidas ni ganancias. Teniendo en consideración los cálculos efectuados el punto de equilibrio es 17.12% de la capacidad total de la planta.

Tabla 7

Estado de Pérdidas y Ganancias.

ESTADO DE PERDIDAS Y GANANCIAS		
Producción anual	40'000,000	kg
Precio de venta por unidad	0.75	\$/kg
Ingreso neto de ventas anuales	30'000,000	\$
Costo total de fabricación (producción)	22'077,912	\$
Utilidad Bruta	7'922,088	\$
Impuesto a la renta (30 %)	1'828,174	\$
Utilidad neta	6'093,914	\$
Ingreso neto de ventas anuales = Producción anual * Precio de venta unitario		
Utilidad Bruta = Ingreso Neto de Ventas Anuales - Costo Total de Fabricación		
Utilidad Neta = Utilidad Bruta - Impuesto a la Renta.		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Análisis Económico.

VALORES CALCULADOS	VALOR	ACEPTABLE
Retorno sobre la Inversión antes del pago de impuestos	60.42%	> 35 %
Retorno sobre la Inversión después del pago de impuestos	43.01%	> 12 %
Tiempo de recuperación del dinero antes de impuestos	1.33	< 5 años
Tiempo de recuperación del dinero después de impuesto	1.67	
Punto de equilibrio	17.12%	< 50%

Fuente: Elaboración propia

IV. CONCLUSIONES

- 4.1. Se realizó el estudio de mercado a nivel nacional y se llegó a determinar que la demanda insatisfecha que se proyectó de bis hidroxí etilén tereftalato (BHET) para el 2028 será de 259539 ton por año.
- 4.2. Se determinó que el factor más influyente para que se determine el tamaño de planta será la disponibilidad de materia prima (PET reciclado), en esa base el tamaño definido será de 40000 ton/año, es decir 5000 kg/hr.
- 4.3. Se pudo realizar el estudio de ingeniería y se determinó que el mejor proceso para la producción BHET a partir de PET reciclado es la glicólisis catalizada con un catalizador volátil, totalmente recuperable. El balance de masa indica que se va emplear 1.052 kg de PET reciclado por 1 kg de BHET.
- 4.4. La factibilidad económica de la planta se puede interpretar con los siguientes indicadores:
La inversión total que se realizó para la instalación de la planta de producción de antocianinas asciende a \$ 11'978,190
Punto Equilibrio del proyecto es 17.123%
Tiempo de recuperación de la inversión 1.33 años antes de impuestos
Tiempo de recuperación de la inversión 1.67 años después de impuestos
La tasa de retorno proyectada sobre la inversión es de 43.01 % después de los impuestos.
El costo de producción por kg de BHET es \$ 0.5519
El precio de venta por kg de BHET es \$ 0.75 colocado en fábrica.
- 4.5. La planta estará permanentemente a la conservación del medio ambiente, haciendo el tratamiento debido a las aguas residuales del proceso que contiene un nivel bajo de materia orgánica.

V. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar la instalación de la planta de producción de BHET para cubrir la demanda nacional como insumo para producir PET virgen.

Se recomienda un reciclaje selectivo para aumentar el rendimiento del proceso.

Evaluar el uso de la instalación de una planta de producción de PET virgen inmediatamente a continuación de la planta de producción de BHET.

VI. BIBLIOGRAFIA

- Aguado, A., Martínez, L., Becerra, L., Arieta, M., Arnaiz, S., Asueta, A., Robertson, I. (2014). Chemical depolymerisation of PET complex waste: hydrolysis vs. glycolysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 16, Issue 2, pp 201-210.
- Al-Sabagh, A., Yehia, F., Eissa, A., Moustafa, M., Eshaq, G., Rabie, A., ElMetwally, A. (2015). Glycolysis of Poly(ethylene terephthalate) Catalyzed by the Lewis Base Ionic Liquid. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 23 (53), pp. 18443-18451.
- Andina. (17/05/2015). Más de 18,000 toneladas de basura se genera en el Perú diariamente. Recuperado de: <https://andina.pe/agencia/noticia-mas-18000-toneladas-basura-se-genera-el-peru-diariamente-556509.aspx>
- Baca Urbina G. (2001). Evaluación de Proyectos. McGraw-Hill. México.
- Capeletti, M., Sedran, U., y Passamonti, F. (2016). Optimización de parámetros de reacción en la glicólisis del PET. XXV Congreso Iberoamericano de Catálisis. Montevideo, Uruguay.
- Chemicalbook. (2019). Terephthalic acid bis(2-hydroxyethyl) ester. Recuperado de: <https://www.chemicalbook.com/Price/959-26-2.htm>
- Fukushima, K., Coulembier, O., Lecuyer, J., Almegren, H., Alabdulrahman, A., Alsewailem F., Mcneil, M., Dubois, P., Hedrick, J. (2018). Organocatalytic Depolymerization of Poly(ethylene terephthalate). *Journal of Polymer Science*, DOI 10.1002/POLA
- GMT – Grupo Transmerquim. (2014). Etilenglicol: Hoja de datos de Seguridad. Recuperado de: <http://www.gtm.net/images/industrial/e/ETILENGLICOL.pdf>
- Greenblue. (2018). Chemical Recycling: Making Fiber-to-Fiber Recycling a Reality for Polyester Textiles. Recuperado de: <http://greenblueorg.s3.amazonaws.com/smm/wp-content/uploads/2017/11/Report.pdf>
- Hachi, J., y Rodríguez, J. (2010). Estudio de factibilidad para reciclar envases plásticos de polietileno tereftalato (PET), en la ciudad de Guayaquil. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, Sede Guayaquil.
- Herrera, R., y Estrada, A. (2012). Despolimerización de botellas de politereftalato de etileno (PET) post-consumo mediante glicolisis. Efecto del catalizador y del tipo de glicol. *Revista Iberoamericana de Polimeros*, 13 (3), pp. 117-129.

- Imran, M., Kim, B., Han, M., Cho, B. y Kim, D. (2010). Sub- and supercritical glycolysis of polyethylene terephthalate (PET) into the monomer bis(2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET).
- Imran, M., Kim, D., Al-Masry, W., Mahmood, A., Hassan, A., Haider, S., Ramay, S. (2013). Manganese-, cobalt-, and zinc-based mixed-oxide spinels as novel catalysts for the chemical recycling of poly(ethylene terephthalate) via glycolysis. *Polymer Degradation and Stability*, 98 (4), pp. 904-915.
- Medina, J., Saldaña, C., Hernández, V., Becerra, S. (2011). Diseño de una trituradora para plástico Polietileno de Tereftalato (PET). Artículo en: Hacia la sustentabilidad: los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima. SIIR. Recuperado en:
- Méndez, P. (2016). Detrás de la producción del PET. *Plastics Technology México*. Departamento de Procesos de Transformación, Centro de Investigación en Química Aplicada.
- Mendoza, T., y Troncoso, J. (2018). Proyecto para la creación de una empresa prestadora de servicios de gestión de recojo de residuos sólidos en el distrito de Villa María del Triunfo. (tesis pregrado). Universidad San Ignacio de Loyola, Facultad de Ingeniería. Lima.
- Olivera, F. (2016). Diseño de una red de recolección de botellas PET en Lima. (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- Ortega, N. (2013). América Latina: casos de éxito en reciclaje de PET. *Tecnología del Plástico*, Edición 4, Vol. 26, pp. 18-21.
- Pingale, N., y Shukla, S. (2018). Microwave assisted ecofriendly recycling of poly (ethelyene terephthalate) bottle waste. *European Polymer Journal*, 44 (12), pp.4151-4156.
- Medina, R. (2011). Diseño de una trituradora de plástico. Polietileno de tereftalato (PET). Artículo en: Hacia la sustentabilidad: los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima, pp275-280 ISBN 978-607-607-015-4. Recuperado de: [http://www.redisa.net/doc/artSim2011/TecnologiasParaElManejoDeResiduosSolidos/Dise%C3%B1o%20de%20una%20trituradora%20para%20pl%C3%A1stico%20Polietileno%20de%20Tereftalato%20\(PET\).pdf](http://www.redisa.net/doc/artSim2011/TecnologiasParaElManejoDeResiduosSolidos/Dise%C3%B1o%20de%20una%20trituradora%20para%20pl%C3%A1stico%20Polietileno%20de%20Tereftalato%20(PET).pdf)

- Ministerio del Ambiente. (2019). En Chilca se instalará el primer parque industrial de talla mundial del Perú. Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/novedades/chilca-se-instalara-primer-parque-industrial-talla-mundial-peru>
- Mohamad, G. y Sayaf, M. (2012). From PET waste to novel Polyurethanes. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/221929081>
- Moral, A., Irusta, R., Martín, J., Martínez, L. (2015). Depolymerization of PET bottle wastes to produce highvalue BHET monomer using ethylenglycol. *Journal of applied Polymer Science*, Vol 87, 1569-1573.
- Ortega, M. (2017). El reciclaje de PET esta en su mejor momento. *Tecnología del Plástico*, 26 (4), pp. 12-15.
- Plastics Insight. (2019). Mono-Ethylene Glycol (MEG): Production, Market, Price and its Properties. Recuperado de: <https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/mono-ethylene-glycol-meg/>
- Reyes, J. (2009). Estudio de factibilidad para la instalación de una planta recicladora de envases de PET. Tesis de pregrado. UPIICSA IPN.
- Salazar, J. (2017). Percepción frente a los proyectos de ley sobre el plástico de un solo uso. Conociendo a la Industria Plástica en el Perú. Recuperado de: [http://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2018/Produccion/files/ppt/4ta_\(2\)sesion_presentaci%C3%B3n_ing._salazar_congreso_02-10-18.pdf](http://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2018/Produccion/files/ppt/4ta_(2)sesion_presentaci%C3%B3n_ing._salazar_congreso_02-10-18.pdf)
- Sinha, V., y Patel, M. (2010). PET Waste Mangement by Chemical recycling: a review.
- SIN-IEES. (2019). Reporte Sectorial N°4-2019: Fabricación de productos de plástico. Sociedad Nacional de Industrias (SIN), Instituto de Estudios Económicos y Sociales. Recuperado de: https://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/Reporte-Sectorial-PI%C3%A1sticos_2019.pdf
- Tecnología de los Plásticos. (2019). Blog dedicado a los materiales plásticos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado. Recuperado de: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/proceso-de-reciclaje-del-pet.html>
- Wang, C., Yue, Q., Zhang, L, Ni, Y., Jin, Y. (2011). Glycolysis of poly(ethylene terephthalate) (PET) using basic ionic liquids as catalysts. *Polymer Degradation and Stability*, 96 (4), pp. 399-403.

- Yue, Q., Xiao, L.,Zhang, M. y Bai, X. (2013). The Glycolysis of Poly(ethylene terephthalate) Waste: Lewis Acidic Ionic Liquids as High Efficient Catalysts. *Polymers*, 5 (3), pp. 1258-1271.
- Zamudio, K., y Cuervo, L. (2013). Obtención del bis-hidroxi etilen tereftalato (BHET) por el método de glicolisis a partir del PET post-consumo grado botella. (Tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. México.

ANEXOS

ANEXO 1: BALANCE DE MASA

Pesos moleculares de los principales componentes:

Etilenglicol: 62 g/mol

PET: 192 g/mol

BHET: 254 g/mol

TBD: 139.20 g/mol

BALANCE EN LA PLANTA DE RECICLAJE MECANICO

Del total que ingresa el 20% es el residuo que está formado por PVC, LPDE, residuos sólidos, botellas verdes o azules.

$m_A = 5259.857 \text{ kg/hr}$

Residuos, m_B'

$m_B' = 1051.971 \text{ kg/hr}$

Escamas de PET limpias: m_A'

$m_A' = 4207.886 \text{ kg/hr}$

La composición de las escamas de PET es:

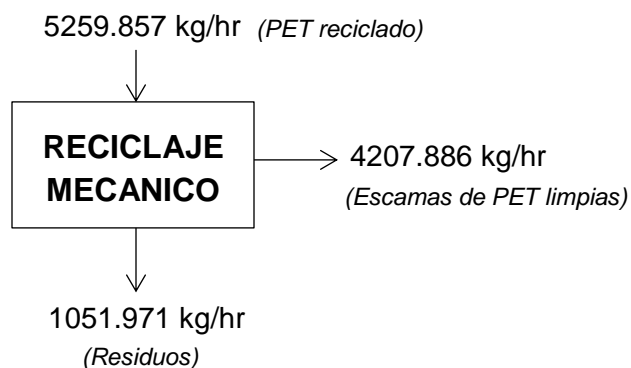
PET = 90%, PET químicamente puro

RELL = 6%, Aditivos y rellenos que se coloca al PET para mejorar sus propiedades mecánicas.

HUM = 3%, Humedad de las escamas de PET

CAT = 0.5%, Sales catiónicas presentes en el PET comercial

ANI = 0.5%, Sales aniónicas presentes en el PET comercial



BALANCE EN EL REACTOR

Los reactivos y catalizador en base al PET químicamente puro: la relación molar recomendable es 16:0.1:1 de etilenglicol (EG), catalizador (TBD), y PET. Teniendo en cuenta que los pesos moleculares son en orden, 62, 140 y 192 gr/mol, respectivamente. Transformando en relación en peso: 992:14:192, es decir 5.167:0.0729:1.0.

También se debe tener en cuenta la reacción:



$$192 \text{ kg} \quad 62 \text{ kg} \quad 254 \text{ kg}$$

ENTRADAS AL REACTOR

CORRIENTE A':

$$\text{PET puro: } 4207.886 * 90\% = 3787.097 \text{ kg/hr}$$

$$\text{H}_2\text{O: } 4207.886 * 3\% = 126.237 \text{ kg/hr}$$

$$\text{RELLENO: } 4207.886 * 6\% = 252.473 \text{ kg/hr}$$

$$\text{CAT: } 4207.886 * 0.5\% = 21.039 \text{ kg/hr}$$

$$\text{ANI: } 4207.886 * 0.5\% = 21.039 \text{ kg/hr}$$

$$m_{A'} = 4207.886 \text{ kg/hr}$$

CORRIENTE B: Etilenglicol, EG

$$m_B = 3787.097 * 5.167 = 19567.93 \text{ kg/hr}$$

CORRIENTE C: catalizador, TBD

$$m_C = 3787.097 * 0.0729 = 276.079 \text{ kg/hr}$$

SALIDAS DEL REACTOR

CORRIENTE D: todo el catalizador y toda el agua

$$m_{\text{CatD}}: m_C = 276.079 \text{ kg/hr}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 126.237 \text{ kg/hr}$$

$$m_D = 402.316 \text{ kg/hr}$$

CORRIENTE G: El producto formado según la reacción

$$m_{\text{BHETG}} = 3787.097 * (254/192) = 5010.014 \text{ kg/hr}$$

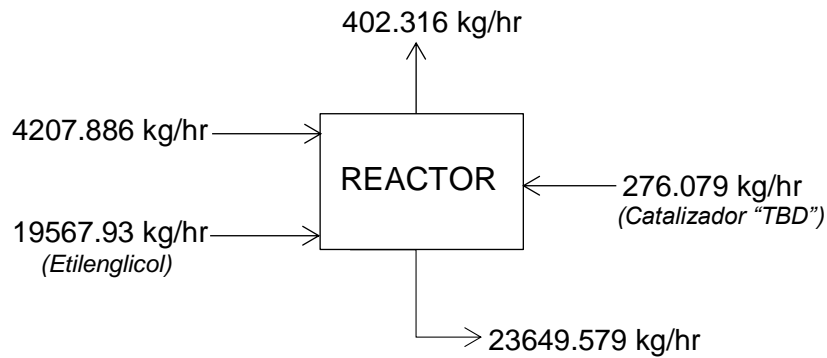
$$m_{\text{EGG}} = 19567.93 - 3787.097 * (62/192) = 18345.014 \text{ kg/hr}$$

$$m_{\text{RELLG}} = 3787.097 * 6\% = 252.473 \text{ kg/hr}$$

$$m_{\text{CAT}}: 4207.886 * 0.5\% = 21.039 \text{ kg/h}$$

$m_{ANI}: 4207.886 \times 0.5\% = 21.039 \text{ kg/hr}$

$m_G = 23649.579 \text{ kg/hr}$



BALANCE EN EL DESTILADOR: Se pierde 0.2% del catalizador en la corriente E.

CORRIENTE F

$m_{CatF} = 0.998 \times m_{CatD} = 275.527 \text{ kg/hr}$

CORRIENTE E:

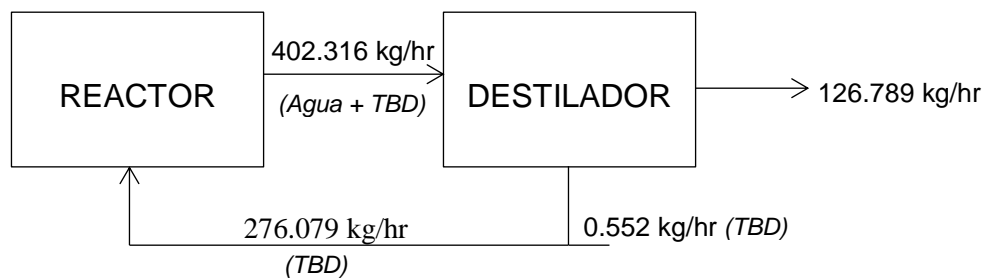
$m_{H_2O E} = m_{H_2O D} = 21.039 \text{ kg/hr}$

$m_{CatE} = 0.2\% m_{CatD} = 0.552 \text{ kg/hr}$

$m_E = 126.789 \text{ kg/hr}$

CORRIENTE S: es la reposición de catalizador que se pierde en el destilador

$m_{CatS} = 276.079 - 275.527 = 0.552 \text{ kg/hr}$



BALANCE EN EL FILTRO: se separa todo lo que se conoce como Relleno, arrastrando un 0.1% del etilenglicol y 0.1% BHET.

CORRIENTE H:

$$m_{EGH} = 0.1\% m_{EGG} = 18.345 \text{ kg/hr}$$

$$m_{BHETH} = 0.1\% m_{BHETG} = 5.01 \text{ kg/hr}$$

$$m_{RELLH} = m_{RELLG} = 252.473 \text{ kg/hr}$$

$$m_H = 275.828 \text{ kg/hr}$$

CORRIENTE I:

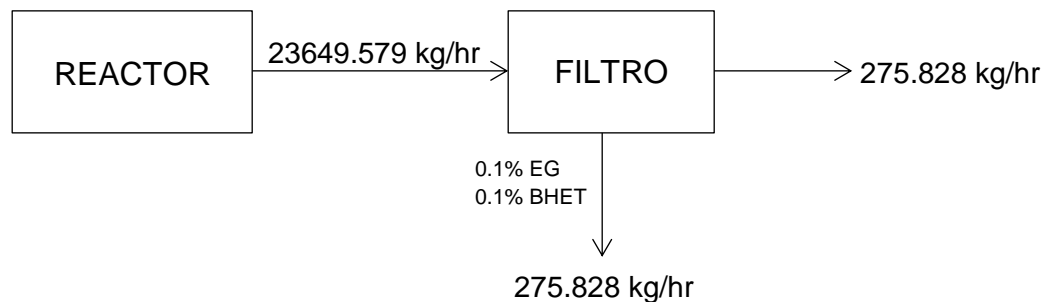
$$m_{BHETI} = m_{BHETG} - m_{BHETH} = 5005.004 \text{ kg/hr}$$

$$m_{EGI} = m_{EGG} - m_{EGH} = 18326.669 \text{ kg/hr}$$

$$m_{CATI}: m_{CATG} = 21.039 \text{ kg/hr}$$

$$m_{ANII}: m_{ANIG} = 21.039 \text{ kg/hr}$$

$$m_I = 23373.751 \text{ kg/hr}$$



BALANCE EN EL INTERCAMBIO ANIONICO: Se separa todas las sales con carga negativa y se pierde 0.05% de Etilenglicol y 0.05% de BHET

CORRIENTE J:

$$m_{ANIJ} = m_{ANII} = 21.039 \text{ kg/hr}$$

$$m_{BHETJ} = 0.05\% m_{BHETI} = 2.503 \text{ kg/hr}$$

$$m_{EGJ} = 0.05\% m_{EGI} = 9.163 \text{ kg/hr}$$

$$m_J = 32.705 \text{ kg/hr}$$

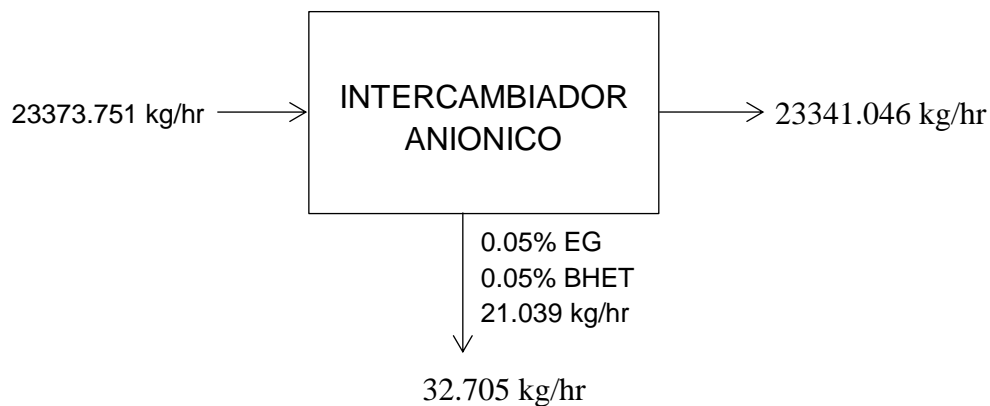
CORRIENTE K:

$$m_{BHETK} = m_{BHETI} - m_{BHETJ} = 5002.501 \text{ kg/hr}$$

$$m_{EGK} = m_{EGI} - m_{EGJ} = 18317.505 \text{ kg/hr}$$

$$m_{CATK}: m_{CATI} = 21.039 \text{ kg/hr}$$

$$m_K = 23341.046 \text{ kg/hr}$$



BALANCE EN EL INTERCAMBIO CATIONICO: Se separa todas las sales con carga positiva y se pierde 0.05% de Etilenglicol y 0.05% de BHET

CORRIENTE L:

$$m_{CATL} = m_{CATK} = 21.039 \text{ kg/hr}$$

$$m_{BHETL} = 0.05\% m_{BHETK} = 2.501 \text{ kg/hr}$$

$$m_{EGL} = 0.05\% m_{EGIK} = 9.159 \text{ kg/hr}$$

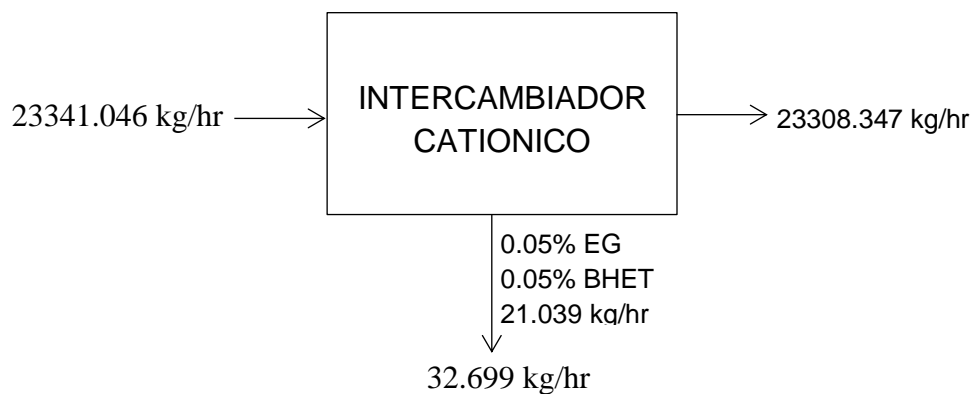
$$m_L = 32.699 \text{ kg/hr}$$

CORRIENTE M:

$$m_{BHETM} = m_{BHETK} - m_{BHETL} = 5000.0 \text{ kg/hr}$$

$$m_{EGM} = m_{EGK} - m_{EGL} = 18308.347 \text{ kg/hr}$$

$$m_M = 23308.347 \text{ kg/hr}$$



BALANCE EN EL CRISTALIZADOR: La composición de la corriente N es igual que de la corriente M, con la diferencia que el BHET en la corriente N está en estado sólido

$$m_N = m_M = 23308.347 \text{ kg/hr}$$



BALANCE EN EL FILTRO: se separa el BHET sólido en P y el 95% del etilenglicol en la corriente O, que se recicla

CORRIENTE O:

$$m_{EGO} = 0.95 \times m_{EGM} = 17392.929 \text{ kg/hr}$$

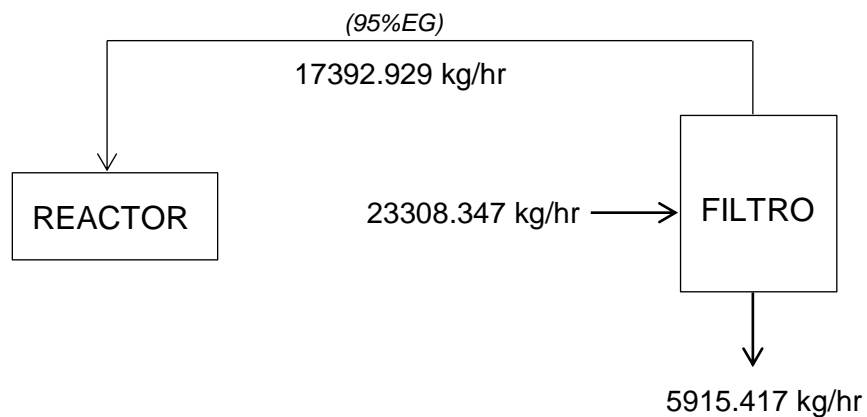
$$m_O = m_{EGO} = 17392.929 \text{ kg/hr}$$

CORRIENTE P

$$m_{EGP} = 0.05 \times m_{EGM} = 915.417 \text{ kg/hr}$$

$$m_{BHETP} = m_{BHETM} = 5000 \text{ kg/hr}$$

$$m_P = 5915.417 \text{ kg/hr}$$



BALANCE EN EL SECADOR: Se recupera el EG presente en la corriente P, y se obtiene el producto puro y seco.

CORRIENTE R

$$m_{BHETR} = m_{BHETP} = 5000 \text{ kg/hr}$$

$$m_R = m_{BHETR} = 5000 \text{ kg/hr}$$

CORRIENTE Q

$$m_{EGQ} = m_{EGP} = 915.417 \text{ kg/hr}$$

$$m_Q = m_{EGQ} = 915.417 \text{ kg/hr}$$

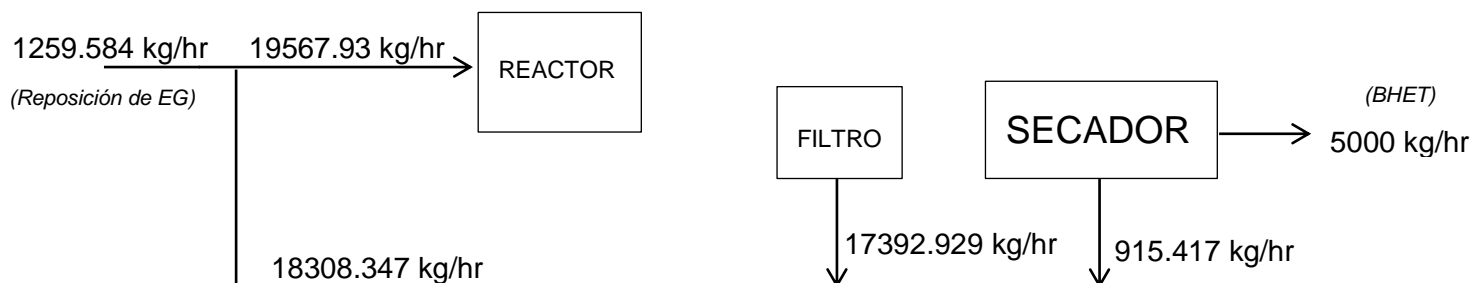
CORRIENTE T: es la suma de las dos corrientes recicladas

$$m_{EGT} = m_{EGO} + m_{EGQ} = 18308.347 \text{ kg/hr}$$

CORRIENTE U: es la reposición de etilenglicol

$$m_{EGU} = m_B - m_T = 1259.584 \text{ kg/hr}$$

$$m_U = m_{EGU} = 1259.584 \text{ kg/hr}$$



ANEXO 2: DISEÑO DE EQUIPOS DE PROCESO-PLANTA DE RECICLAJE MECANICO

Capacidad: 5259.857 kg/hr de PET reciclado

Fabricante: Borotech (https://www.bo-re-tech.com/en/solution_S0001.html)



2 Estimated Plant Parameters

Capacity (kg/h)	Installation Power (kW)	Required Area (m ²)	Manpower	Steam Consumption (kg/h)	Compressed Air (m ³ /min)	Water Consumption (m ³ /hr)
500	200	500	8	280	0.5	0.75
1500	400	700	12	700	0.5	2.25
3000	600	900	18	1300	0.7	4.5
6000	900	1200	30	2300	1	9

*The parameters above is based on the standard configuration, bottle bales condition and factory management will effect the water consumption.

*Water consumption above is based on using water recycling system.

Se selecciona el modelo de 6000 kg/hr.

3

PET Flakes Quality Reference Table

No.	Description	AA level (ppm)	A level (ppm)
1	PVC content	≤ 30	≤ 100
2	PP/PE/colored flake/metal and other impurity content	≤ 70	≤ 100
3	Total impurity	≤ 100	≤ 200

*Factory management will affect the content of PVC.

*Under normal circumstances, at least 80% of flakes will achieve the PVC content less 30 ppm of AA level.

4

Production Consumption

Average Consumption per ton Flakes

Capacity (kg/h)	Electricity (KWH)	Steam (kg)	Washing Detergent (kg)	Water (T)
500	140	600	10	1.5
1500	130	500	8	1.5
3000	120	450	8	1.5
6000	100	400	8	1.5

ANEXO 3: DISEÑO DE EQUIPOS DE PROCESO-REACTOR

Flujo de entrada:

A': 4207.886 kg/hr

B: 19567.93 kg/hr

C: 276.079 kg/hr

Ingrese los Siguietes Datos		
Viscosidad (kg/m.s)	:	0.02
Densidad (kg/m ³)	:	1150
Volumen del Biorreactor (m ³)	:	3.5
Relación Altura/Diámetro	:	1.3
rpm del Agitador	:	100
Eficiencia del Motor (%)	:	80

Flujo másico total: 24051.895 kg/hr

Densidad de la mezcla: 1150 kg/m³

Flujo volumétrico: 20.915 m³/hr

Tiempo de residencia: 10 min = 0.167 horas

Tiempo de residencia = volumen reactor/flujo volumétrico

Volumen de trabajo del reactor: $20.915 \times 0.167 = 3.493 \text{ m}^3$

Se va a considerar 3.5 m³

datos ingresados al software de diseño de reactor CSTR:

SE USARA 1 TURBINAS RUSHTON

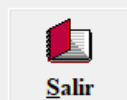
Resultados

Altura Biorreactor (m) : 2.207
Diámetro Biorreactor (m) : 1.698
Volumen Biorreactor (m3) : 5
Volumen Trabajo (m3) : 3.5
Altura Líquido (m) : 1.546
Ancho Baffle (m) : 0.1698
Separación Baffle a Tanque (m) : 0.034

Características de Turbina

Diámetro Turbina (m) : 0.566
Diámetro Disco Turbina (m) : 0.377
Ancho de Cada Paleta (m) : 0.17
Altura de Cada Paleta (m) : 0.142
Distancia Fondo Tanque a Turbina (m) : 0.6792

$K_L a$ (1/s) : 3.3864
Oxígeno Disuelto : (mmol/L) -0.3854
% del valor sat. del oxígeno : -145.45



Caraterísticas de Flujo

Número de Reynolds : 30700.783
Régimen de Flujo : TURBULENTO
Número de Potencia : 5.6



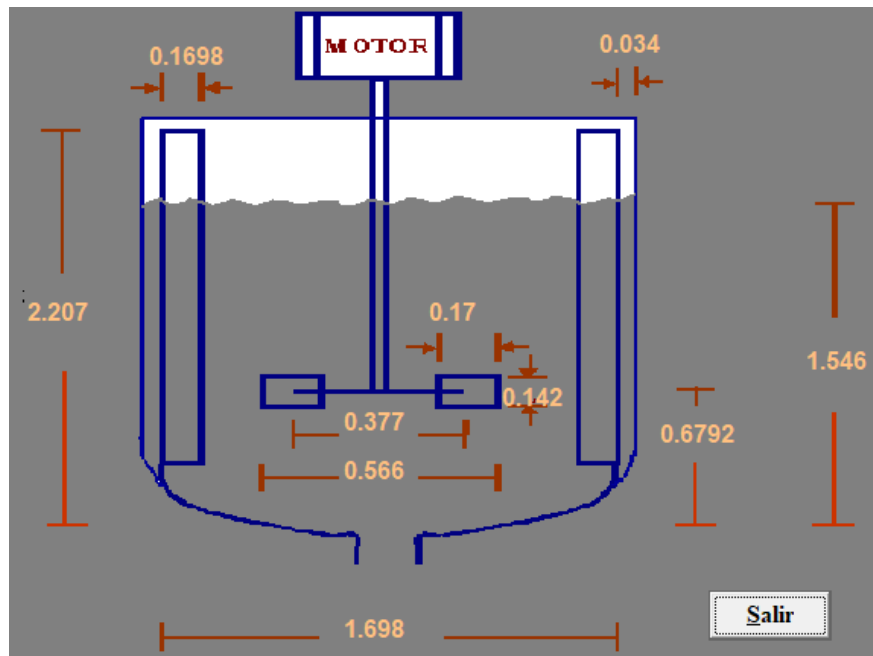
Características del Motor

rpm Agitador : 100
Eficiencia Motor (%) : 80
Potencia Real (kW) : 2.165
Tiempo de Mezcla (s) : 25.48

Desea hacer
escalamiento (Scale
Up o Scale Down)?

SI

NO



Dimensiones de la chaqueta de calentamiento:

Temperatura: 190°C

Vapor: 1.7 MPa de 203 a 220°C. Se escoge vapor de 1.7 MPa y 210°C

Coeficiente global de transferencia de calor: $U = 0.2 - 1.7 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Se va a considerar $1.4 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Calor específico del PET: $1100 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Calor específico del etilenglicol: $2408.62 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Calor específico del TBD: $1620 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Porcentajes de la mezcla:

PET: 17.5%

EG: 81.4%

TBD: 1.1%

Calor específico promedio: $0.175 \cdot 1100 + 0.814 \cdot 2408.62 + 0.011 \cdot 1620$

C_p promedio = $2170.937 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Calor transferido: $24051.895 \times 2170.937 \times (190 - 25) = 2492.696 \text{ kW}$

Área de chaqueta: $Q = A \cdot U \cdot \Delta T_L$

Vapor: 210°C, sale condensado a 210°C

Fluido: 25°C sale a 190

LMTD = 74.17°C

$A = 2492.696 / (1.4 \times 74.17)$

$A = 24.006 \text{ m}^2$

Empleando tubería de 50 mm de diámetro para la chaqueta

Según Tabla (<https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/heating-with-coils-and-jackets#article-top>)

Tubería de 50 mm para chaqueta de calentamiento: 0.189 m²/m

Diámetro de tanque: 1.698 m

Longitud de una vuelta de chaqueta: 1.698 x 3.1416 = 5.334 m

Longitud total requerido: 24.006/0.189 = 127.016 m

Número de vueltas de chaqueta: 127.016/5.334 = 23.813 vueltas

Se considera 24 vueltas

Altura total requerida de chaqueta: 24 x 50 mm = 1200 mm = 1.2 m

Altura disponible: 1.546 m

Por lo tanto, es correcto

Cantidad de vapor: 1.7 MPa y 210 °C tiene 2811.38 KJ/kg

Calor requerido: 2492.696 kW = 2492.696 kJ/s

Cantidad de vapor: 2492.696/2811.38 = 0.887 kg/s = 3191.922 kg/hr

ANEXO 4: DISEÑO DE EQUIPOS DE PROCESO-FILTRO

Flujo total: $mG = 23649.579 \text{ kg/hr}$

Composición:

BHET: 21.2%, densidad: 1.3 kg/L

EG: 77.6%, densidad: 1.11 kg/L

RELL: 1.1%, densidad: 1.5 kg/L

CAT: 0.1%; densidad: 2.4 kg/L

ANI: 0.1%; densidad: 2.4 kg/L

Densidad promedio:

$$0.212 \cdot 1.3 + 0.776 \cdot 1.11 + 0.011 \cdot 1.5 + 0.001 \cdot 2.4 + 0.001 \cdot 2.4 = 1.158 \text{ kg/L}$$

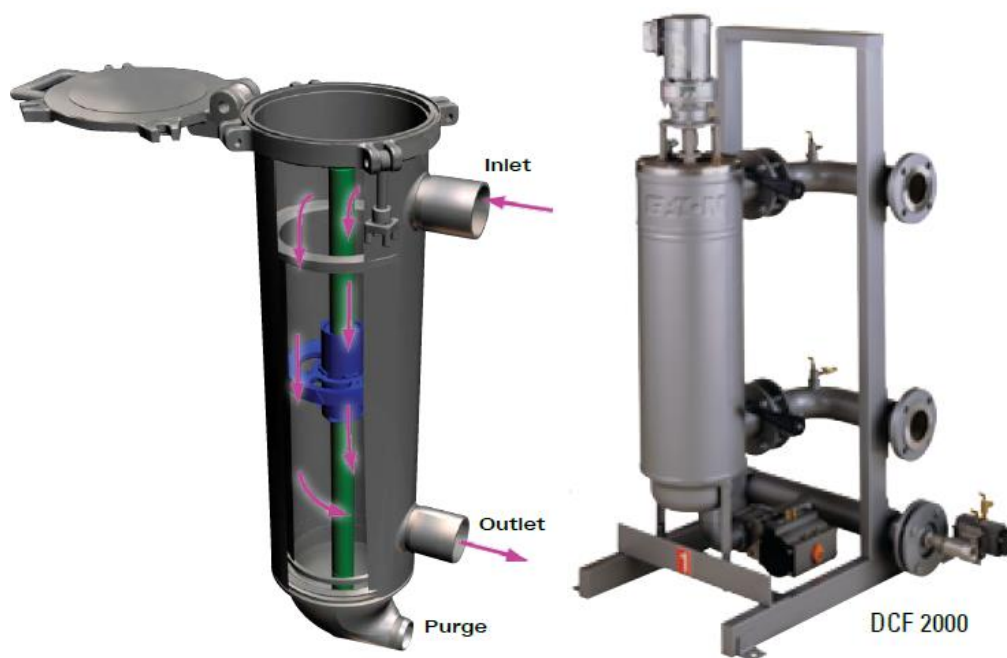
Flujo volumétrico: $23649.579 / 1.158 = 20422.78 \text{ litros/hr} = 89.929 \text{ GPM}$

Filtro de membrana

Temperatura de operación: 80°C

Marca: Ronningen-Petter

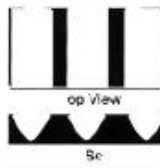
Con limpieza mecánica automática



Comparison Chart

	DCF 400	DCF 800	DCF 1600	DCF 2000
Total Volumetric Capacity	0.94 gal (3.5 liters)	3.9 gal (14.8 liters)	11 gal (41.6 liters)	11 gal (41.6 liters)
Purge Chamber Capacity	4 fl. oz (119 ml)	25 fl. oz (0.74 liters)	1.5 gal (6 liters)	1.5 gal (6 liters)
Filtration Surface	112 in²	264 in²	610 in²	610 in²
Area	(722 cm²)	(1703 cm²)	(3935 cm²)	(3935 cm²)
Flow Rate Range at 100µ	2–30 gpm	10–60 gpm	30–200 gpm	30–200 gpm
	0.45–6.8 m³/hr	2.27–13.6 m³/hr	6.8–45.4 m³/hr	6.8–45.4 m³/hr
Temperature, maximum*	400° F (204° C)	400° F (204° C)	400° F (204° C)	180° F (82° C)
Pressure, maximum	300 psi (21 bar)	150 psi (2–10.5 bar) standard	-----	
Single Unit Weight	35 lbs (16 kg)	75 lbs (34 kg)	215 lbs (97.5 kg)	564 lbs (256 kg)
Service Height	61.25" (1556 mm)	69.25" (1760 mm)	102" (2591 mm)	72" (1829 mm)
Service Requirements				
Air for Actuator Drive, min.	400/800 = 60 psi at 5 cfm		1600/MCF = 80 psi at 5 cfm	
Electrical for Controllers	Control for all four models, automated only, 110/220V, 50/60 Hz, single phase			
Electrical for Motor Drive	Control option for DCF 2000 only, single phase 110/220V, 50/60 Hz for control and three phase 220/380/440/575V (please specify). 50/60 Hz for motor.			

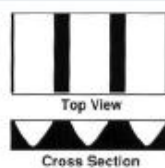
Media Options



Slotted Wedge Wire

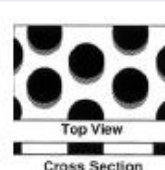
DCF filter screens feature special wedge wire that is honed perfectly circular to guarantee contact with the cleaning disc so the slot openings are smallest

at the screen's surface. This design helps prevent particle plugging of the slot openings while assuring total rated solids removal.



Defined Pore

The tortuous path design of our defined pore media enables elimination of difficult-to-filter gels. It's also calendered flat to ensure a uniform, defined pore size.



Perforated

Perforated screens feature precise and uniform perforation patterns for complete removal of larger solids

Media Retentions				
Type	Inch	Micron	Mesh	% Open Area
Slotted	.0006"	15	—	2
Wedge	.001"	25	—	3
Wire	.0015"	38	400	5
	.002"	50	325	6
	.003"	75	200	9
	.004"	100	150	12
	.006"	150	100	17
	.007"	180	80	19
	.008"	200	70	21
	.009"	230	60	23
	.015"	380	40	33
	.024"	600	30	44
	.030"	700	20	50
	.045"	1140	15	60
<hr/>				
Defined Pore	.001"	25	400	No direct flow path.
	.0015"	38	325	
	.002"	50	200	
	.003"	75	150	No real value for % open area.
	.004"	100	100	
	.006"	150	80	
	.009"	230	70	
	.015"	380	60	
	.024"	610	40	
<hr/>				
Perforated	1/16"	1575	12	40
	1/8"	3175	6	40
	1/4"	6380	3	57

Por la temperatura de operación se selecciona el modelo DCF 2000, que puede procesar 30 a 200 gpm de líquido. Medio filtrante malla de alambre tejido de con abertura de 15 micras.

ANEXO 5: DISEÑO DE EQUIPOS DE PROCESO-INTERCAMBIADOR CATIONICO

Flujo total: 23373,751 kg/hr

Densidad: 1.13 kg/litro

Flujo volumétrico: $23373,751/1.13 = 20684.736$ litros/hr

Contenido de cationes: 21.039 kg/hr

Resina catiónica Amberlite IR120 Na

(<https://www.lenntech.com/Data-sheets/Rohm-&-Haas-Amberlite-IR-120-Na-L.pdf>)

Ciclo: Na. (Disponible en ciclo H).

Capacidad total de intercambio mínimo (Na): ≥ 2.0 eq/l. (1.9 eq/l = 41.5 kgr/ft³ como CaCO₃).

Peso: 52.5 lb/ft³ (840 g/l).

Retención de humedad (Na): 45 a 50%

Condiciones de operación:

Temperatura máxima.: 135 °C

Regeneración: 10% NaCl

Profundidad de la cama mínimo: 700 mm.

Calculando capacidad: $2000 \text{ mEq} \text{ Na}^+/\text{L} = 4597.8 \text{ mg/L} = 0.046 \text{ kg/L}$

Flujo de cationes: 21.039 kg/hr

Resina necesaria: $21.039/0.046 = 457.37$ litros/hr

Tiempo de retención mínima: 6 minutos = 0.1 horas

Volumen de resina necesaria: $457.37 \times 0.1 = 45.737$ litros

Densidad global de la resina: 0.840 kg/litro

Peso de resina necesaria: $45.737 \times 0.840 = 38.419$ kg

Volumen de resina: 47.737 litros

Altura mínima: 700 mm, se va a considerar 1.2 m

$(3.1416 \times D^2/4) \times 1.2 = 0.047737 \text{ m}^3$

Diámetro: 0.247 m

Altura total: 10 cm en entrada y 10 cm en salida: $1.2 + 0.2 = 1.4$ m

ANEXO 6: DISEÑO DE EQUIPOS DE PROCESO-INTERCAMBIADOR ANIONICO

Flujo total: 23341.046 kg/hr

Densidad: 1.128 kg/litro

Flujo volumétrico: $23373,751/1.128 = 20692.417$ litros/hr

Contenido de aniones: 21.039 kg/hr

Resina anionica Amberlite IRA402 Cl

<https://www.carbotecnia.info/PDF/medfiltrantes/IRA402.pdf>

Capacidad total de intercambio mínimo (Cl^-): ≥ 1.2 eq/L

Peso: 670 g/l

Retención de humedad (Cl^-): 49 a 60%

Condiciones de operación:

Temperatura máxima.: 60 °C

Regeneración: NaOH, 2 a 4%

Profundidad de la cama mínimo: 700 mm.

Calculando capacidad: $1200 \text{ mEq Na}^+/\text{L} = 4260.0 \text{ mg/L} = 0.0426 \text{ kg/L}$

Flujo de cationes: 21.039 kg/hr

Resina necesaria: $21.039/0.0426 = 493.873$ litros/hr

Tiempo de retención mínima: 6 minutos = 0.1 horas

Volumen de resina necesaria: $493.873 \times 0.1 = 49.3873$ litros

Densidad global de la resina: 0.670 kg/litro

Peso de resina necesaria: $49.3873 \times 0.670 = 33.089$ kg

Volumen de resina: 49.3873 litros

Altura mínima: 700 mm, se va a considerar 1.2 m

$(3.1416 \times D^2/4) \times 1.2 = 0.0493873 \text{ m}^3$

Diámetro: 0.251 m

Altura total: 10 cm en entrada y 10 cm en salida: $1.2 + 0.2 = 1.4$ m

ANEXO 7: DISEÑO DE EQUIPOS DE PROCESO-CRISTALIZADOR-ENFRIADOR

Flujo: 23308.347 kg/hr

Composición:

BHET = 21.5%

EG = 78.5%

Densidad: $1.3 \times 0.215 + 0.785 \times 1.11 = 1.151$ kg/L

Flujo volumétrico: $23308.347 / 1.151 = 20250.518$ L/hr

Tiempo de cristalización: 12 minutos = 0.2 horas

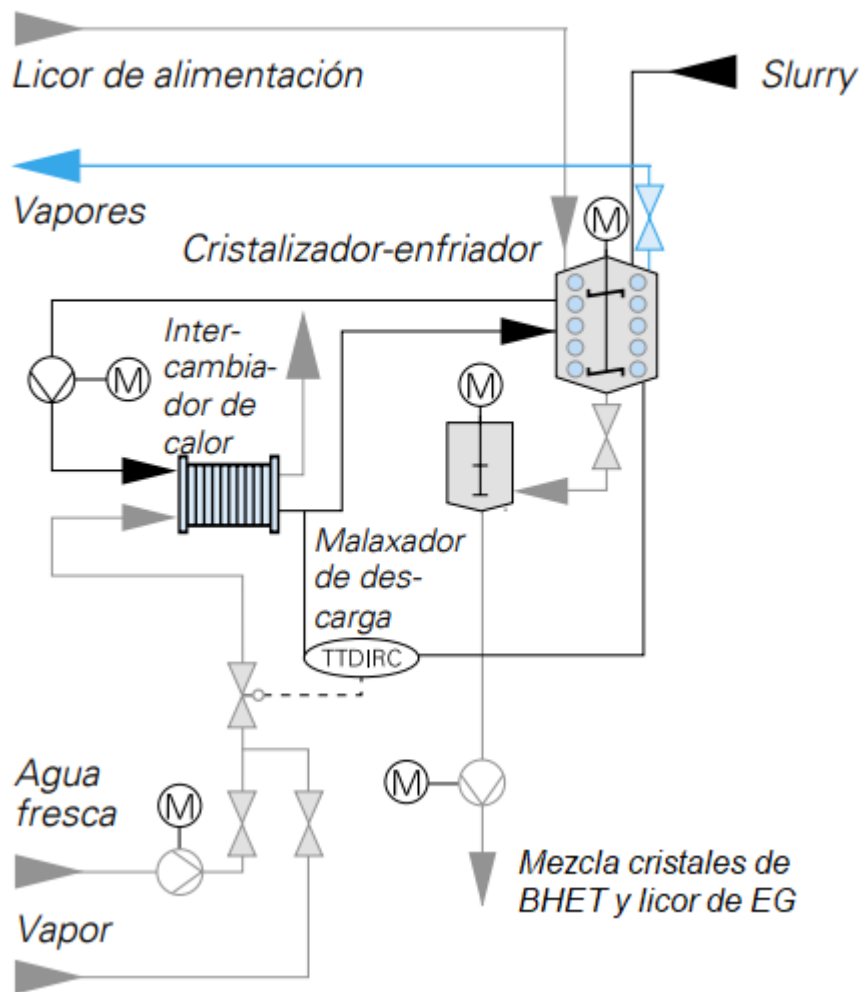
Volumen necesario de cristalizador: $20250.518 \times 0.20 = 4050.104$ L = 4.05 m³

Fabricante: BMA, Cristalizador – Enfriador: (https://www.bma-worldwide.com/fileadmin/_migrated/content_uploads/Kristallisation_span_4_01.pdf)

Tamaños de construcción estándares de los cristalizadores-enfriadores de pie de cocida

Volumen útil	m ³	2,1	4,2	5,0	6,8	10,0	15,0
Diámetro	m	1,4	1,8	2,0	2,0	2,4	2,6
Altura total máx.*	m	4,4	5,3	6,0	6,0	6,3	7,2
Superficie de enfriamiento	m ²	11,3	19,0	21,0	27,0	44,0	61,0

* agitador inclusive



El cristalizador – enfriador es especial para el proceso. Por ese motivo siendo el de 4.2 m³ suficiente, por seguridad se escoge el de 5.0 m³. Incluye agitador y sistema de enfriamiento.

ANEXO 8: DISEÑO DE EQUIPOS DE PROCESO-FILTRO DE BHET SOLIDO

Flujo total: 23308.347 kg/hr

Porcentaje de solidos: $(5000/23308.347) \times 100 = 21.5\%$

Torta (corriente P) = 5915.417 kg/hr

Composición:

EG: 915.417 kg/hr, 15.5%

BHET: 5000 kg/hr; 84.5%

Densidad: $1.11 \times 0.155 + 0.845 \times 1.33 = 1.296 \text{ kg/L}$

Torta: $5915.417/1.296 = 4564.365 \text{ litros/hora}$

Tiempo por batch (carga, proceso, descarga, limpieza): 5 minutos = 0.083 hora Volumen de
torta por batch: $4564.365 \times 0.083 = 378.842 \text{ litros}$

Tipo de filtro: filtro prensa automatizado

Fabricante: Diemme S.p.A, www.diemme-spa.com - filterdiv@diemme-spa.com

Model	Plate size [mm]	Working pressure [bar]		No. of installed plates		Cake volume [litres]		Filtration area [m ²]		Length [mm]		Empty weight [Kg]	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1000	1000 x 1000	15		25	134	475	3644	37	212	7200	12200	12500	22000
1200	1200 x 1200	15		60	155	1600	5852	126	350	10200	14200	17400	26400
1500	1500 x 1500	15		66	170	2886	10410	223	605	11200	16200	21750	33000

De acuerdo al catálogo, se utilizará el modelo 1000, con 25 platos (mínimo) lo que dara una capacidad de procesar un torta de 475 litros por carga. Se requiere solo 378.842 litros. Por lo tanto, el área de filtración necesario será 37 m².



ANEXO 9: DISEÑO DE EQUIPOS DE PROCESO-SECADOR

Flujo: 5915.417 kg/hr

Líquido a separar: 915.417 kg/hr, en porcentaje representa 15.5%

Tipo de secador: plano tipo cadena serie LPH

Fabricante: Jiangsu Hualiang Machinery Co., Ltd

(<http://www.hualiang-group.com>)

LPH Series Chain Flat Dryer Technical Data									
Model		LPH40	LPH60	LPH80	LPH100	LPH120	LPH150	LPH200	LPH250
Pressure of Heat Conduction Medium (MPa)	Steam	0.6							
	Heat Conducting Oil	Normal Pressure							
Heating Area (m ²)		40	60	80	100	120	150	200	250
Output (t/d)		50	80	100	120	150	180	250	300
Linear Speed of Scraper (mm/s)		15 to 100							
Height of Layer (mm)		40 to 100							
Number of Slab Layer (layer)		4 to 6	6 to 8	6 to 8	6 to 12	8 to 14	8 to 16	8 to 16	8 to 16
Motor Power (kw)		3	4	4	5.5	5.5	7.5	11	15
Max Moisture Reduction (Percent)	Steam	18							
	Heat Conducting Oil	10 to 20							



Capacidad de producción: $5000 \text{ kg/hr} = 120000 \text{ kg/día} = 120 \text{ ton/día}$

Según catalogo: modelo LPH120, tiene capacidad 150 ton/día

a) Vapor para la evaporación

Calor de evaporación del etilenglicol: 52.24 kJ/mol

Temperatura de ebullición del EG: 197.60°C

Temperatura de operación: 198°C

Vapor: 1.7 MPa , 210°C

Cantidad de EG evaporada: $915.417 \text{ kg/hr} = 14.749 \text{ kmol/hora}$

Calor necesario: $52.24 \times 14.749 \times 1000 = 770487.76 \text{ kJ/hora}$

Vapor: 1.7 MPa y 210°C tiene 2811.38 KJ/kg

Cantidad de vapor: $770487.76/2811.38 = 274.06 \text{ kg}$

b) Vapor para calentamiento: 50°C a 198°C

Calor específico del etilenglicol: 2408.62 J/kg.K

Calor necesario: $915.417 \times 2.40862 \times (198-40) = 348372.888 \text{ kJ/hora}$

Vapor necesario: $348372.888/2811.38 = 123.915 \text{ kg/hr}$

Total, vapor de a y b: $274.06 + 123.915 = 397.975 \text{ kg/hr}$

ANEXO 10: EVALUACION ECONOMICA**COSTO DE EQUIPO PRINCIPAL Y AUXILIAR:**

EQUIPO	PRECIO CIF 2019 DOLARES
1 Planta de reciclaje mecánico de PET, 6000 kg/hr	3200000
1 Reactor CSTR, 5 m ³ , acero inoxidable, agitador	600000
1 Filtro de cartucho, 30 - 200 gpm, sistema limpieza	120000
1 Intercambiador catiónico, sistema de regeneración	90000
1 Intercambiador aniónico, sistema de regeneración	90000
1 Cristalizador – enfriador, 5.0 m ³ , agitador	750000
1 filtro prensa automatizado, 37 m ²	250000
1 secador, plano tipo cadena, 5.5 kW	180000
3 intercambiadores de calor	270000
Otros	120000
TOTAL	5670000

ANEXO 11: INVERSION TOTAL

a. DETERMINACION DE COSTOS DIRECTOS TOTALES

Costo CIF de los equipos: 5'670,000 dólares

El precio de los equipos transportados a la planta: teniendo en cuenta que la planta se ubicará en Chilca. Se considera 3% del costo CIF de los equipos.

$$0.03 \times 5'670,000 = 170,100 \text{ dólares.}$$

Costo de instalación de todos los equipos : Es del 8% del equipo en planta.

$$CEInst = 0.08 \times 5'840,000 \quad CEInst = 467,208 \text{ dólares}$$

Costo de control por instrumentación: Es del 4% en equipo en planta

$$Cont. = 0.04 \times 5'840,000 \quad Cont. = 233,604 \text{ dólares}$$

Costo de tuberías y accesorios: Es del 8% en equipo en planta

$$Cont. = 0.08 \times 5'840,000 \quad Cont. = 467,208 \text{ dólares}$$

Costo de instalaciones eléctricas: Es del 4% del equipo en planta

$$CElec = 0.04 \times 5'840,000 \quad CElec = 233,604 \text{ dólares}$$

Costo de Edificios: Es del 5% del equipo en planta

$$CostEdif = 0.05 \times 5'840,000 \quad CostEdif = 292,005 \text{ dólares}$$

Costos de Terrenos y Mejoras: Es del 4% del equipo en planta

$$CostMej = 0.04 \times 5'840,000 \quad CostMej = 233,604 \text{ dólares}$$

Costos de Servicios: Es del 15% del equipo en planta

$$CostSer = 0.15 \times 5'840,000 \quad CostSer = 876,015 \text{ dólares}$$

COSTOS DIRECTOS TOTALES

$$CDT = CEP + CEInst + CTubAcc + CElec + CCimEst + CEdif + CTerrMej + CSer$$

$$CDT = 8'643,348 \text{ dólares}$$

Costos de Ingeniería y supervisión: Es del 8% del equipo en planta

$$C_{\text{Ingsup}} = 0.08 \times 5'840,000 \quad C_{\text{Ingsup}} = 467,208 \text{ dólares}$$

Costos de construcción: Es del 15% del equipo en planta

$$C_{\text{Const}} = 0.15 \times 5'840,000 \quad C_{\text{Const}} = 876,015 \text{ dólares}$$

Costos de Seguros e impuestos de la construcción: Es del 2% del equipo en planta

$$C_{\text{Seg}} = 0.02 \times 5'840,000 \quad C_{\text{Seg}} = 116,802 \text{ dólares}$$

Costos de honorarios para contratistas: Es del 5% del equipo en planta

$$C_{\text{Hon}} = 0.05 \times 5'840,000 \quad C_{\text{Hon}} = 292,005 \text{ dólares}$$

Costos imprevistos: Es del 4% del equipo en planta

$$C_{\text{Impr}} = 0.04 \times 5'840,000 \quad C_{\text{Impr}} = 233,604 \text{ dólares}$$

COSTOS INDIRECTOS TOTALES

$$CI = C_{\text{Ingsup}} + C_{\text{Const}} + C_{\text{Seg}} + C_{\text{Hon}} + C_{\text{Impr}}$$

$$CI = 1'985,634 \text{ dólares}$$

CAPITAL FIJO TOTAL

Es la suma de costos directos, costos indirectos, capital de puesta en marcha e intereses de financiamiento.

$$CFT = CD + CI$$

$$CFT = 10'628,982 \text{ dólares}$$

CAPITAL DE TRABAJO

En base a los consumos de la materia prima e insumos.

NOMBRE	CANTIDAD	PRECIO
PET reciclado empacado	5259.9 kg/8000 hr	0.20 dol/kg
Etilenglicol	1259.6 kg/8000 hr	1.05 dol/kg
TBD, catalizador volatil	0.553 kg/8000 hr	200 dol/kg
Resina catiónica	0.02 kg/8000 hr	2.9 dol/kg
Resina aniónica	0.02 kg/8000 hr	2.9 dol/kg

Operación continua, 300 días al año, 3 turnos, 8000 horas al año.

Inventario de Materia Prima: es considerada una semana de materia a los costos de puesto en planta.

$$\text{InvMP} = 414,208 \text{ dólares}$$

Inventario de Materia en Proceso: Se puede considerar un día del costo total de la producción

Producto: 5000 kg/8000 hr

Costo Producto: 0.5 dol/kg (costo aproximado)

$$\text{InvMPProc} = \text{Producto} \times 24 \text{ hr} \times \text{Costo Producto} = 60,000 \text{ dólares}$$

Inventario de Producto en almacén: Se puede estimar el costo de manufactura para siete días de producción

$$\text{InvPro} = 8000/12 \times 6 \text{ hr} \times \text{Producto} \times \text{Costo Producto} = 277,778 \text{ dólares}$$

Cuentas por cobrar: Equivalente a 30 días de ventas

Precio de venta = 0.70 dólares/kg (Precio aproximado del producto)

$$\text{Cuenta por cobrar} = 8000/12 \times 6 \text{ hr} \times \text{Producto} \times \text{Precio venta} = 388,889 \text{ dólares}$$

Disponible en Caja: Es considerado aquí el costo de 30 días de producción. Sirviendo para pagar salarios, suministros, así como otros imprevistos.

$$\text{DispCaja} = 8000/12 \times 8 \text{ hr} \times \text{Producto} \times \text{Costo Producto} = 208,333 \text{ dólares}$$

CAPITAL DE TRABAJO

Es la sumatoria del inventario de toda la materia prima, inventario de materia en proceso, inventario de producto, cuentas por cobrar, así como el disponible en caja.

$$\text{CTra} = \text{InvMatPri} + \text{InvMatPro} + \text{InvPro} + \text{Cuentas} + \text{DispCj}$$

$$\text{CTra} = 1'349,208 \text{ dólares}$$

ANEXO 12: INVERSION TOTAL DEL PROYECTO

Aquí se considera la suma del capital fijo total, así como el Capital de Trabajo.

$$\text{INVT} = \text{CFT} + \text{CapTra}$$

$$\text{INVT} = 11'978,190 \text{ dólares}$$

COSTOS DE MANUFACTURA (COSTO TOTAL DEL PRODUCTO)

Costo de Materia Prima: 10-50% del costo del producto total

$$\text{CostMatPri 1} = 8,415,771 \text{ dólares} \quad \text{PET reciclado empacado}$$

$$\text{CostMatPri 2} = 10,580,506 \text{ dólares} \quad \text{Etilenglicol}$$

$$\text{CostMatPri 3} = 884,800 \text{ dólares} \quad \text{TBD, catalizador volátil}$$

$$\text{CostMatPri 4} = 464 \text{ dólares} \quad \text{Resina catiónica}$$

$$\text{CostMatPri 5} = 464 \text{ dólares} \quad \text{Resina aniónica}$$

$$\text{CMP} = 19'882,005 \text{ dol.}$$

Costo de mano de obra: Obedece al número de trabajadores por turno lo cual se relaciona con el grado de automatización de la planta.

$$\text{Trab Turno: } 12$$

$$\text{Mens: } 450 \text{ dol}$$

$$\text{CMobra} = 36 \times 14 \times \text{Mens}$$

$$\text{CMobra} = 226,800 \text{ dólares}$$

Costo de supervisión e ingeniería: 10 - 20% del costo de la mano de obra

$$\text{Cing} = 0.20 \times 226,800$$

$$\text{Cing} = 45,360 \text{ dólares}$$

Costo de mantenimiento: 2 - 10% del capital fijo total. Se considerará 2%

$$C_{\text{mant}} = 0.02 \times \text{CFT}$$

$$C_{\text{mant}} = 212,580 \text{ dólares}$$

Costo de auxiliares y servicios: El 15% del costo de mantenimiento.

$$C_{\text{aux}} = 0.15 \times C_{\text{mant}}$$

$$C_{\text{aux}} = 31,887 \text{ dólares}$$

Costo de suministros de operación: 20% del costo de mantenimiento o 0.5 al 1% de la inversión del capital fijo.

$$C_{\text{sum}} = 0.20 \times C_{\text{mant}}$$

$$C_{\text{sum}} = 42,516 \text{ dólares}$$

$$C_{\text{sum}} = 42,516 \text{ dólares}$$

COSTO DIRECTO DE MANUFACTURA (O DE FABRICACIÓN)

$$\text{CDF} = \text{CMP} + \text{CMobra} + \text{Cing} + C_{\text{mant}} + C_{\text{aux}} + C_{\text{sum}}$$

$$\text{CDF} = 20'441,147 \text{ dólares}$$

Cargas a planillas: 21% de la mano de obra

$$C_{\text{plan}} = 0.21 \times \text{CMobra}$$

$$C_{\text{plan}} = 47,628 \text{ dólares}$$

Gastos de laboratorio: 20% del costo de mano de obra

$$C_{\text{lab}} = 0.20 \times \text{CMobra}$$

$$C_{\text{lab}} = 45,360 \text{ dólares}$$

Gastos generales de planta: 10% del costo de mano de obra

$$\text{Gen} = 0.10 \times \text{CMobra}$$

$$\text{Cgen} = 22,680 \text{ dólares}$$

COSTO INDIRECTO DE MANUFACTURA (O DE FABRICACIÓN)

$$\text{CIF} = \text{Cplan} + \text{Clab} + \text{Gen}$$

$$\text{CIF} = 115,668 \text{ dólares}$$

Depreciación: 10% del capital fijo total

$$\text{Dep} = 0.10 \times \text{CFT}$$

$$\text{Dep} = 1'062,898 \text{ dólares}$$

Impuestos: 1% del capital fijo total

$$\text{Imp} = 0.01 \times \text{CFT}$$

$$\text{Imp} = 106,290 \text{ dólares}$$

Seguros: 1% del capital fijo total

$$\text{Seg} = 0.01 \times \text{CFT}$$

$$\text{Seg} = 106,290 \text{ dólares}$$

COSTOS FIJOS DE FABRICACIÓN

$$\text{CFF} = \text{Dep} + \text{Imp} + \text{Seg}$$

$$\text{CFF} = 1'275,478 \text{ dólares}$$

COSTO DE MANUFACTURA (FABRICACIÓN)

Está referida a la sumatoria de los costos directo e indirecto de fabricación, así como el costo fijo de fabricación.

$$CFab = CDF + CIF + CFF$$

$$CFab = 21'832,293 \text{ dólares}$$

GASTOS GENERALES (GASTOS VAI)

Aquí se consideran los gastos de ventas, administración, así como los de investigación.

Ventas: se consignan aquí los gastos en oficina de ventas, personal de ventas, propaganda, así como la distribución, considerándose 10% del costo fijo de fabricación.

$$Vent = 0.10 \times CFF = 127,548 \text{ dólares}$$

Administración: en este rubro se consideran: el salario de ejecutivos, planilla de oficinistas, suministros de oficinas, así como las comunicaciones. Correspondiendo al 15% de costo de mano de obra, supervisión, además del mantenimiento.

$$Adm = 0.15 (CMobra + Csupeing + Cmant) = 72,711 \text{ dólares}$$

Investigación y Desarrollo: Aquí se va a considerar 20% del precio de Mano de obra

$$Inv = 0.20 \times CMobra = 45,360 \text{ dólares}$$

$$VAI = Vent + Adm + Inv$$

$$VAI = 245,619 \text{ dólares}$$

COSTO TOTAL DE FABRICACIÓN

Se considera como la sumatoria de los costos de Fabricación, así como los Gastos Generales (VAI).

$$CTF = CFab + VAI$$

$$CTF = 22'077,912 \text{ dólares}$$

COSTO UNITARIO.

$$ProdAnual = \text{Producto} \times 8000 \text{ hr}$$

$$ProdAnual = 40'000,000 \text{ kg}$$

$$CostUnit := \frac{CTF}{ProdAnual}$$

$$\text{Costo Unitario} = 0.5519 \text{ dólares/kg}$$

ESTADO DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS

Precio de ventas por unidad

$$Pventa\ 1 = 0.75 \text{ dólares/kg} \quad \text{Producto BHET}$$

Ingreso neto de ventas anuales

$$Ingresovta\ 1 = Prod.Anual.Pvta\ 1$$

$$Ingresovta1 = 30'000,000$$

$$\text{Ingreso vtas} = \text{Ingres vtas}\ 1$$

$$\text{Ingreso vtas} = 30'000,000$$

Costo total de fabricación (producción)

$$CTfabri = CFab$$

$$CTfabri = 22'077,912 \text{ dólares}$$

Utilidad Bruta

$$U_{bruta} = In_{ventas} - C_{t\text{fabri}}$$

$$U_{bruta} = 7'922,088 \text{ dólares}$$

Impuesto a la renta

$$Im_{pRe\text{nta}} = \frac{U_{bruta}}{1.3} \cdot 0.30$$

$$Imp_{Renta} = 1'828,174 \text{ dólares}$$

Utilidad Neta

$$U_{neta} = U_{bruta} - Imp_{Renta}$$

$$U_{neta} = 6'093,914 \text{ dólares}$$

ANEXO 13: ANALISIS ECONOMICO

Tasa interna de Retorno, antes del pago de impuestos

P: inversión total P=INVT

INVT = 11'978,190 dólares

IV: ingreso por ventas IV=Ubruta

VS: depreciación VS=Dep

Dep = 1'062,898 dólares

n: periodo de recuperación de dinero = 5 años

ia = 2 valor supuesto

Dado:

$$P = IV \cdot \left[\frac{(1 + ia)^n - 1}{ia \cdot (1 + ia)^n} \right] + \frac{VS}{(1 + ia)^n}$$

Se despeja el valor de i:

i = 60.42 %

Tasa interna de Retorno, después del pago de impuestos

Inversión total: P P=INVT

Ingreso por ventas: IV IV1=Uneta

Depreciación: VS VS=Dep

Periodo de recuperación de dinero n=5 años

ia=2 valor supuesto

dado

$$P = IV1 \cdot \left[\frac{(1 + ia)^n - 1}{ia \cdot (1 + ia)^n} \right] + \frac{VS}{(1 + ia)^n}$$

$$i = 43.01\%$$

Tiempo de recuperación del dinero antes de impuestos

Se aplicará la siguiente formula:

$$TRId := \frac{INVT}{Ubruta + Dep}$$

$$TRId = 1.33 \text{ años}$$

Tiempo de recuperación del dinero después de impuestos

Se aplicará la siguiente formula:

$$TRId := \frac{INVT}{Uneta + Dep}$$

$$TRId = 1.67 \text{ años}$$

Punto de Equilibrio:

$$CFF = 20,441,147. \text{ dólares}$$

Costo unitario directo de fabricación

$$CUDF := \frac{CDF}{ProdAnual}$$

$$ne = 50,000kg$$

$$Dado: (CIFab + CFF + VAI) + CUDF \cdot ne = Pventa \cdot ne$$

$$ne = Find(ne)$$

$$ne = 6'849,209 \text{ Kg}$$

$$PtoEq := \frac{ne}{ProdAnual} \cdot 100$$

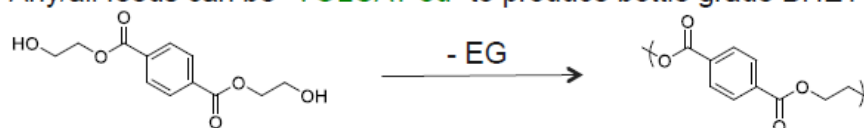
$$PtoEq = 17.12 \%$$

$$PtoEq = 17.12 \%$$

ANEXO 14: BHET CARACTERIZACIÓN DEL POLÍMERO

BHET polymerization to PET*: Polymer Characterization

Any/all feeds can be "VOLCAT-ed" to produce bottle grade BHET (50%)



BHET Monomer Source	Transparency (L*)	Color (b*)
Virgin PET (from TPA/EG)	93	2.3
Virgin PET; Glycolysis (re-polymerized)	87	8.0
VOLCAT BHET (clean, clear flake)	93	2.1
VOLCAT BHET (dirty clear)	92	5.9
VOLCAT BHET (colored flake)	92	5.6
VOLCAT BHET (curbside, dirty)	92	4.5