

# Proyecto Fin de Máster



## Diseño básico y análisis económico del proceso de reciclaje químico de plásticos mediante procesos separación con disolventes

Autor: Javier Slythe

Tutor: Ricardo Arjona Antolín

Tutores externos:

Juan Luis Sanz Yagüe

Ana Marina Lineros

**Máster Universitario en Ingeniería Química y Ambiental**  
**Dpto. Ingeniería Química y Ambiental**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Curso, 2021/2022





# Proyecto Fin de Máster

## Ingeniería Ambiental

### Diseño básico y análisis económico del proceso de reciclaje químico de plásticos mediante procesos separación con disolventes

Autor:  
Javier Slythe

Tutor:  
Ricardo Arjona Antolín

Tutores externos:  
Juan Luis Sanz Yagüe  
Ana Marina Lineros

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Máster: Diseño básico y análisis económico del proceso de reciclaje químico de plásticos mediante procesos separación con disolventes

Autor: Javier Slythe

Tutor: Ricardo Arjona Antolín

Tutores externos: Juan Luis Sanz Yagüe, Ana Marina Lineros

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El secretario del Tribunal



*A mi familia*  
*A mis profesores*



# Agradecimientos

---

En primer lugar, a mi familia, ellos, que siempre estuvieron presente, incondicionalmente y de infinitas formas, aunque así sea a la distancia, en esta y en todas las etapas.

Luego a mis compañeros, amigos, que fueron sostén inconmensurable en esta experiencia que además de ser un desafío académico se encuentra acentuado por la diferencia de latitudes con nuestro hogar.

Por último y no menos importante, a todo el equipo docente y no docente de la querida Universidad de Sevilla, que de una u otra forma siempre encuentran la manera de ayudar a superar retos académicos y profesionales.

No quiero olvidarme de la ciudad que me cobijó y por siempre ocupará un lugar en mi corazón, Sevilla, con su gente, vecinos, colegas.

*Javier Slythe  
Sevilla, 2022*



El estudio realizado permitió analizar el desempeño tanto técnico como económico y financiero de una planta de reciclaje químico utilizando técnicas de purificación basado en solventes, para un plástico específico de envoltorio tipo film.

Para ello se realizó un estudio del tipo/s de plástico que componen este envoltorio tipo film para luego analizar las diferentes técnicas asociadas a su reciclaje.

Se amplió el análisis escogiendo dos técnicas que hoy en día se encuentran en escala laboratorio, escalándolas y realizando una comparativa técnica realizando un diseño básico con su correspondiente diagrama de flujo.

Luego, verificando que técnica y operativamente estas técnicas poseen condiciones similares, se extendió el análisis aplicando indicadores económicos y financieros para lograr una conclusión amplificada y lograr un corolario más acertado.

Por último, se analizaron diferentes criterios del plan de acción de Economía Circular de la Unión Europea con el fin de conocer cuáles de estos se encuentran alineados con nuestro proyecto, y los beneficios asociados que esto trae aparejado.

The study carried out made it possible to analyze the technical, economic, and financial performance of a chemical recycling plant using solvent-based purification techniques for a specific plastic film-type wrapper.

For this, a type/s of plastic that make up this film-type wrapper was made to later analyze the different techniques associated with its recycling.

The analysis was expanded by choosing two techniques that are currently on a laboratory scale, scaling them and performing a comparative technique by making a basic design with its corresponding flow chart.

Then, verifying that technically and operationally these techniques have similar conditions, the analysis will be weakened by applying economic and financial indicators to achieve an amplified conclusion and achieve a more accurate corollary.

Finally, different criteria of the Circular Economy action plan of the European Union were analyzed to know which of these are aligned with our project, and the associated benefits that this brings.

Agradecimientos .....	vii
Resumen .....	ix
Abstract .....	x
Índice .....	xi
Índice de Tablas .....	xiii
Índice de Ilustraciones .....	xv
Lista de Abreviaturas .....	xvi
<b>1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Objetivos y Alcance.....</b>	<b>2</b>
2.1 <i>Objetivos</i> .....	2
2.1.1 <i>Objetivos Específicos</i> .....	2
2.2 <i>Alcance</i> .....	2
<b>3 Análisis y Estudio del Material: Plástico Tipo Film.....</b>	<b>4</b>
<b>4 Estudio del estado de arte de las tecnologías disponibles .....</b>	<b>6</b>
4.1 <i>Técnicas de reciclaje</i> .....	6
4.1.1 <i>Despolimerización térmica</i> .....	6
4.1.2 <i>Despolimerización química</i> .....	6
4.1.3 <i>Purificación basada en solventes</i> .....	7
4.2 <i>Técnicas de purificación basada en solventes</i> .....	7
4.2.1 <i>Técnicas 1 y 2</i> .....	8
4.2.2 <i>Técnica 3</i> .....	10
4.2.3 <i>Técnica 4</i> .....	11
4.2.4 <i>Conclusiones de técnicas</i> .....	13
<b>5 Diseño Básico de las Alternativas Propuestas .....</b>	<b>14</b>
5.1 <i>Alternativa A – Utilización de Tolueno como solvente</i> .....	16
5.1.1 <i>Descripción del proceso – Alternativa A (Tolueno como solvente)</i> .....	18
5.2 <i>Alternativa B – Utilizando Xileno como solvente</i> .....	21
5.1.2 <i>Descripción del proceso – Alternativa B (Xileno como solvente)</i> .....	23
<b>6 Análisis Técnico de las Alternativas Propuestas .....</b>	<b>27</b>
6.1 <i>Balance de materia</i> .....	27
6.1.1 <i>Balance de materia alternativa A – Utilización de Tolueno como solvente</i> .....	27
6.1.2 <i>Balance de materia alternativa B – Utilización de Xileno como solvente</i> .....	37
6.2 <i>Balance de energía y servicios auxiliares</i> .....	46
6.2.1 <i>Balance de energía y servicios auxiliares alternativa A – Utilización de Tolueno como solvente</i> ....	46
6.2.2 <i>Balance de energía y servicios auxiliares alternativa B – Utilización de Xileno como solvente</i> .....	52
6.3 <i>Comparación técnica</i> .....	58
<b>7 Análisis Económico y Financiero de las Alternativas Propuestas.....</b>	<b>59</b>
7.1 <i>Presupuesto de Inversión – Alternativa A</i> .....	59
7.1.1 <i>Capital Fijo – Alternativa A</i> .....	59
7.1.2 <i>Presupuesto de Operación – Alternativa A</i> .....	62
7.2 <i>Ingresos – Alternativa A</i> .....	65
7.3 <i>Presupuesto de Inversión – Alternativa B</i> .....	66
7.3.1 <i>Capital Fijo – Alternativa B</i> .....	66

7.3.2	<i>Presupuesto de Operación – Alternativa B</i> .....	69
7.4	<i>Ingresos – Alternativa B</i> .....	72
7.5	<i>Resumen de costos e ingresos de alternativas</i> .....	73
7.6	<i>Financiamiento y Rentabilidad – Alternativa A y B</i> .....	74
7.6.1	<i>Financiamiento</i> .....	74
7.6.2	<i>Flujo de fondos</i> .....	74
7.7	<i>Conclusiones económicas y financieras de las alternativas</i> .....	77
<b>8</b>	<b>Análisis del Proyecto: Indicadores de Economía Circular</b> .....	<b>78</b>
8.1	<i>Plan de acción de Economía Circular</i> .....	78
8.2	<i>Economía circular en el proyecto de estudio</i> .....	79
<b>9</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>80</b>
	<b>Referencias</b> .....	<b>81</b>

# Índice de Tablas

Tabla 1 - Tipo de material empleado para fabricar plástico tipo film	4
Tabla 2 - Tipos de reciclaje químico de plásticos [5]	7
Tabla 3 - Proceso básico de dilución-precipitación	8
Tabla 4 - Resumen técnicas de disolución/re-precipitación	8
Tabla 5 - Porcentaje de recuperación posterior a la técnica dilución/re-precipitación	9
Tabla 6 - Resistencia mecánicas luego de la disolución/re-precipitación en materiales modelos	9
Tabla 7 - Resistencia mecánicas luego de la disolución/re-precipitación en materiales residuales	9
Tabla 8 - Prueba de disolución con diferentes relaciones de solventes	10
Tabla 9 - Resultados de punto de fusión y cristalinidad utilizando Tolueno como solvente y n-Hexano como precipitante	11
Tabla 10 - Prueba de disolución con diferentes relaciones de solventes	12
Tabla 11 - Resultados de punto de fusión y cristalinidad utilizando Xileno y n-Hexano	12
Tabla 12 - Resumen de resultados de técnicas	13
Tabla 13 - Suposiciones del diseño básico para ambas alternativas	27
Tabla 14 - Orden y nomenclatura de las sustancias implicadas en el proceso	28
Tabla 15 - Caudales y composiciones etapa I - Alternativa A	31
Tabla 16 - Balance de masa global por componente - Etapa 1 - Alternativa A	32
Tabla 17 - Caudales y composiciones etapa II - Alternativa A	34
Tabla 18 - Balance de masa global por componente - Etapa 2 - Alternativa A	34
Tabla 19 - Caudales y composiciones etapa III - Alternativa A	35
Tabla 20 - Balance de masa global por componente - Etapa 3 - Alternativa A	36
Tabla 21 - Balance de masa global - Alternativa A	36
Tabla 22 - Orden y nomenclatura de las sustancias implicadas en el proceso	37
Tabla 23 - Caudales y composiciones etapa I - Alternativa B	40
Tabla 24 - Balance de masa global por componente - Etapa 1 - Alternativa B	41
Tabla 25 - Caudales y composiciones etapa II - Alternativa B	43
Tabla 26 - Balance de masa global por componente - Etapa 2 - Alternativa B	43
Tabla 27 - Caudales y composiciones etapa III - Alternativa B	44
Tabla 28 - Balance de masa global por componente - Etapa 3 - Alternativa B	45
Tabla 29 - Balance de masa global - Alternativa B	45
Tabla 30 - Caudales máxicos de las corrientes de ingreso y salida del Secador (D1) - Alternativa A	46
Tabla 31 - Caudales máxicos de las corrientes de ingreso y salida de R1 - Alternativa A	47
Tabla 32 - Caudales máxicos de las corrientes de ingreso y salida del Secador (D2) - Alternativa A	49
Tabla 33 - Caudales máxicos de las corrientes de ingreso y salida de Torre (C1) - Alternativa A	50
Tabla 34 - Balance de energía simulación C1 ChepSep - Alternativa A	51
Tabla 35 - Balance temperaturas simulación C1 ChepSep - Alternativa A	51
Tabla 36 - Resumen de energía y servicios auxiliares - Alternativa A	51
Tabla 37 - Caudales máxicos de las corrientes de ingreso y salida del Secador (D1) - Alternativa B	52
Tabla 38 - Caudales máxicos de las corrientes de ingreso y salida de R1 - Alternativa B	53
Tabla 39 - Caudales máxicos de las corrientes de ingreso y salida del Secador (D2) - Alternativa A	55
Tabla 40 - Caudales máxicos de las corrientes de ingreso y salida de Torre (C1) - Alternativa B	56
Tabla 41 - Balance de energía simulación C1 ChepSep - Alternativa B	57
Tabla 42 - Balance temperaturas simulación C1 ChepSep - Alternativa B	57
Tabla 43 - Resumen de energía y servicios auxiliares - Alternativa B	57
Tabla 44 - Resumen de comparación técnica de alternativas	58
Tabla 45 - Resumen costos directos - Alternativa A	60
Tabla 46 - Estimación de costos de instrumentación, cañerías, aislación e instrumentación y control – Alternativa A	61
Tabla 47 - Estimación de costos de Ingeniería y construcción, edificios y contingencias – Alternativa A	61
Tabla 48 - Resumen costos indirectos (puesta en marcha y prueba) - Alternativa A	62

<i>Tabla 49 – Resumen costos totales de capital fijo - Alternativa A</i>	62
<i>Tabla 50 - Resumen costo anual de materia prima e insumos - Alternativa A</i>	63
<i>Tabla 51 - Resumen mano de obra directa - Alternativa A</i>	63
<i>Tabla 52 - Resumen costos de servicios auxiliares - Alternativa A</i>	63
<i>Tabla 53 - Resumen costo de mantenimiento anual - Alternativa A</i>	64
<i>Tabla 54 - Resumen costo total de producción - Alternativa A</i>	64
<i>Tabla 55 - Resumen precio de venta - Alternativa A</i>	65
<i>Tabla 56 - Resumen ingresos por ventas - Alternativa A</i>	65
<i>Tabla 57 - Resumen beneficio neto - Alternativa A</i>	65
<i>Tabla 58 - Resumen costos directos - Alternativa B</i>	67
<i>Tabla 59 - Estimación de costos de instrumentación, cañerías, aislación e instrumentación y control – Alternativa B</i>	68
<i>Tabla 60 - Estimación de costos de Ingeniería y construcción, edificios y contingencias – Alternativa B</i>	68
<i>Tabla 61 - Resumen costos indirectos (puesta en marcha y prueba) - Alternativa B</i>	69
<i>Tabla 62 – Resumen costos totales de capital fijo - Alternativa B</i>	69
<i>Tabla 63 - Resumen costo anual de materia prima e insumos - Alternativa B</i>	70
<i>Tabla 64 - Resumen mano de obra directa - Alternativa B</i>	70
<i>Tabla 65 - Resumen costos de servicios auxiliares - Alternativa B</i>	70
<i>Tabla 66 - Resumen costo de mantenimiento anual - Alternativa A</i>	71
<i>Tabla 67 - Resumen costo total de producción - Alternativa B</i>	71
<i>Tabla 68 - Resumen precio de venta - Alternativa B</i>	72
<i>Tabla 69 - Resumen ingresos por ventas - Alternativa B</i>	72
<i>Tabla 70 - Resumen beneficio neto - Alternativa B</i>	72
<i>Tabla 71 - Resumen de costos de capital, de operación e ingresos</i>	73
<i>Tabla 72 - Flujo de fondos - Alternativa A</i>	75
<i>Tabla 73 - Flujo de fondos - Alternativa B</i>	76
<i>Tabla 74 - Resumen VAN y TIR - Alternativas A y B</i>	77
<i>Tabla 75 – Criterios del plan de acción de EC alineados con el proyecto</i>	79
<i>Tabla 76 - Cuantificación del impacto en el Plan de Acción de Economía Circular</i>	79

# Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1 - Estructura de Polietileno</i> .....	5
<i>Ilustración 2 - Ingreso de materia prima</i> .....	14
<i>Ilustración 3 - Especificaciones materia prima [9]</i> .....	15
<i>Ilustración 4 - Proceso Creasolv®</i> .....	15
<i>Ilustración 5 - Proceso VinyLoop®</i> .....	16
<i>Ilustración 6 - Diagrama de flujo de proceso utilizando Tolueno como solvente</i> .....	17
<i>Ilustración 7 - Acondicionamiento materia prima - Alternativa A</i> .....	18
<i>Ilustración 8 - Etapa dilución - Alternativa A</i> .....	19
<i>Ilustración 9 - Filtrado y precipitación - Alternativa A</i> .....	19
<i>Ilustración 10 - Acondicionamiento del producto - Alternativa A</i> .....	20
<i>Ilustración 11 - Columna destilación - Alternativa A</i> .....	21
<i>Ilustración 12 - Diagrama de flujo de proceso utilizando Xileno como solvente</i> .....	22
<i>Ilustración 13 - Acondicionamiento materia prima - Alternativa B</i> .....	23
<i>Ilustración 14 - Etapa dilución - Alternativa B</i> .....	24
<i>Ilustración 15 - Filtrado y precipitación - Alternativa B</i> .....	24
<i>Ilustración 16 - Acondicionamiento del producto - Alternativa B</i> .....	25
<i>Ilustración 17 - Columna destilación - Alternativa B</i> .....	26
<i>Ilustración 18 - Etapas proceso Alternativa A</i> .....	28
<i>Ilustración 19 - Etapa I - Alternativa A</i> .....	30
<i>Ilustración 20 - Etapa II - Alternativa A</i> .....	33
<i>Ilustración 21 - Etapa III - Alternativa A</i> .....	35
<i>Ilustración 22 - Etapas proceso Alternativa B</i> .....	37
<i>Ilustración 23 - Etapa I - Alternativa B</i> .....	39
<i>Ilustración 24 - Etapa II - Alternativa B</i> .....	42
<i>Ilustración 25 - Etapa III - Alternativa B</i> .....	44
<i>Ilustración 22 - Diagrama de flujo equipo: Secador (D1) - Alternativa A</i> .....	46
<i>Ilustración 23 - Diagrama de flujo equipo: Dilución (R1) - Alternativa A</i> .....	47
<i>Ilustración 24 - Diagrama de flujo equipo: Secador (D2) - Alternativa A</i> .....	48
<i>Ilustración 25 - Diagrama de flujo equipo: Torre (C1) - Alternativa A</i> .....	50
<i>Ilustración 30 - Diagrama de flujo equipo: Secador (D1) - Alternativa B</i> .....	52
<i>Ilustración 31 - Diagrama de flujo equipo: Dilución (R1) - Alternativa B</i> .....	53
<i>Ilustración 24 - Diagrama de flujo equipo: Secador (D2) - Alternativa B</i> .....	54
<i>Ilustración 25 - Diagrama de flujo equipo: Torre (C1) - Alternativa B</i> .....	56

# Lista de Abreviaturas

---

LDPE: Polietileno de baja densidad.

HDPE: Polietileno de alta densidad.

LDPE: Polietileno de media densidad.

PET: Tereftalato de polietileno.

PE: Polietileno.

PP: Polipropileno.

PS: Poliestireno.

PVC: Policloruro de vinilo.

PU: Poliuretano.

PLA: Ácido poliláctico.

PC: Policarbonato.

PHA: Polihidroxialcanoatos.

PEF: Furanoato de Polietileno.

PMMA: Metacrilato.

PetE: Éter de petróleo.

EDIFESA: Estudios Dirección e Investigación de Fermentaciones Especiales.

ABOGARSE: Abonos Orgánicos de Sevilla.

RSU: Residuos Sólidos Urbanos.

TIR: Tasa Interna de Retorno.

VAN: Valor Actual Neto.

TAE: Tasa anual efectiva.

# 1 INTRODUCCIÓN

---

La problemática actual que afrontamos con la generación y acumulación de residuos, nos obliga a generar e innovar sobre nuevas técnicas de tratamiento, reciclaje y recuperación de diferentes corrientes que hasta hace no muchos años eran consideradas desechos.

Un residuo según lo define el artículo 3.a. de la Ley 22/2011 es “cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención o la obligación de desechar” [1].

En países más desarrollados, el crecimiento poblacional, el desarrollo y el aumento sostenido de la calidad de vida ha llevado a multiplicar la generación de residuos exponencialmente. A su vez, este desarrollo implica un consumo, muchas veces, desmedido de recursos naturales.

En este contexto, se han desarrollado diversas técnicas de revalorización de estos residuos, ya sean químicas, físicas o biológicas con el fin de utilizarlos como material y reincorporarlos en el mercado o valorizarlos energéticamente.

Una de las tantas corrientes de residuos de gran impacto para el ambiente cuando no se trata correctamente son los plásticos de un solo uso. Si bien en diferentes países existen políticas de reducción de estos, se encuentran muchos casos, por ejemplo, envoltorios de grado alimenticio que es complejo el reemplazo por otros materiales.

Existen numerosas técnicas de reciclaje de plásticos según la complejidad del tipo de polímero con el que precisamos tratar. Hasta la fecha, solo una fracción de los plásticos de desecho se reutiliza y recicla. De hecho, reciclar plásticos sigue siendo un gran desafío debido a barreras técnicas y rentabilidad económica insuficiente, especialmente en plásticos mixtos.

De esta gran variedad de plásticos, existen algunas, en particular el plástico tipo film que presenta dificultades para lograr una eficiente separación mediante técnicas mecánicas.

El presente proyecto, se centra en analizar una técnica de reciclaje químico, la cual sea ambientalmente amigable y potencialmente rentable para la separación y recuperación de plásticos tipo film.

# 2 OBJETIVOS Y ALCANCE

---

## 2.1 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es realizar un estudio comparativo de dos diferentes técnicas de reciclaje químico basado en la purificación con solventes para el plástico tipo film abarcando los puntos de vista técnico, económico y financiero. Para lograr esto se plantean los siguientes objetivos específicos.

### 2.1.1 Objetivos Específicos

- Identificación y estudio del material a reciclar: plástico tipo film. Tipos de plásticos que lo componen, para luego estudiar las tecnologías para su reciclaje.
- Estudio del estado de arte de las tecnologías disponibles para el reciclaje químico de diferentes tipos de plásticos (Despolimerización térmica, Despolimerización química y Purificación basada en solventes).
- Estudio de dos técnicas de purificación basada en solventes para la realización del diseño básico y comparativa.
- Definición y diseño básico de las alternativas propuestas para el análisis comparativo.
- Análisis técnico de las alternativas propuestas.
- Análisis económico y financiero de las alternativas propuestas.
- Análisis del proyecto teniendo en cuenta los indicadores de Economía Circular.

## 2.2 Alcance

El alcance del presente proyecto abarca los análisis técnicos, y luego, económicos y financieros de la separación y posterior reciclaje para el plástico film.

Para cumplir con los objetivos se plantean diferentes alternativas de procesos de separación y su estudio separando las siguientes *etapas*:

- Análisis y estudio del material: plástico tipo film residual.
  - Revisión bibliográfica de los diferentes polímeros que componen el plástico tipo film de estudio.
- Estudio del estado de arte de las tecnologías disponibles.
  - Estudio de diferentes tecnologías de separación para los plásticos y justificación de la técnica más adecuada.
  - Ilustración de técnicas de separación basada en solventes a escala laboratorio con diferentes solventes.
- Definición y diseño básico de las alternativas propuestas para el análisis.
  - Definición y escalado a un proceso con una producción base de dos alternativas de separación con su respectivo diagrama de flujo de proceso.
  - Se tiene en cuenta en este caso de escalado, la limitación de que los estudios son a escala laboratorio.

- Análisis técnico de las alternativas propuestas.
  - Memoria descriptiva, balance básico de masa y energía, teniendo en cuenta cantidades de materiales e insumos para realizar el proceso, rendimiento, viabilidad técnica, equipos principales, capacidad de tratamiento.
- Análisis comparativo económico y financiero de las alternativas propuestas.
  - Inversiones en base a estimaciones de referencias bibliográficas planteando una capacidad base de producción.
  - Análisis comparativo financiero de las alternativas propuestas verificando una TIR mínima del 10%.
- Análisis de la implementación de las alternativas para el reciclaje de estos tipos de plásticos teniendo en cuenta los indicadores de Economía Circular.
  - Evaluación de la integración de este proceso con los criterios definidos en el plan de acción de Economía Circular planteado por la comisión europea en los aspectos:
    - “Key product value chains” – Plastics.
    - “Less waste, more value”. Circular.

Este proyecto se realiza con la tutoría externa del director de proyectos y la responsable de proyectos I+D del grupo EDIFESA, los cuales se encuentran realizando el proyecto “FilmValue” (Reciclado y revalorización mediante procesos químicos y mecánicos de la fracción plástico film). Por lo que el alcance de este trabajo se limita al estudio teórico del potencial de implementación de un proceso de reciclaje de plástico tipo film en el centro Montemarca-Cónica de la ciudad de Sevilla.

# 3 ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL MATERIAL: PLÁSTICO TIPO FILM

El objetivo de este capítulo es determinar de qué polímeros está conformado el plástico tipo film que será objeto de estudio a lo largo del trabajo. Para ello se realizó una revisión bibliográfica.

El embalaje tipo film, en general, se utiliza para entregar un producto del fabricante o distribuidor al minorista o consumidor final, proteger durante el envío, la exhibición y el almacenamiento de diferentes tipos de productos. El embalaje flexible tipo film multicapa es la combinación de dos o más capas compuesto que proporciona propiedades funcionales, protectoras o decorativas. La introducción de nuevos polímeros, el desarrollo de nuevas tecnologías y la aparición de nuevas aplicaciones de envasado ha llevado a altas tasas de producción de este tipo de material. [2]

Cualquiera que sea la aplicación, estos materiales poliméricos están diseñados para cumplir con distintos requisitos específicos. Estos pueden ser uno o más de los siguientes:

- Tasa de permeabilidad.
- Adhesión.
- Sellado de alta resistencia.
- Sellado a baja temperatura.
- Sellado en caliente.
- Resistencia al impacto.
- Resistencia a la tracción.
- Resistencia a temperaturas.
- Transparencia.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia química.

Los plásticos tipo film son ampliamente utilizados, están compuestos de capas de peso ligero. Existen numerosos tipos de polímeros utilizados para la fabricación de plásticos tipo film tal como se detalla en la tabla a continuación. Pero actualmente el predominante es el Polietileno. [3]

Tipo de Material	Comentario
<b>Polietileno</b>	El más utilizado para el plástico tipo film, puede ser de baja densidad (LDPE) en su mayoría, de alta densidad (HDPE), de media densidad (MDPE) o de baja densidad lineal (LLDPE).
<b>PET</b>	El segundo más utilizado para este tipo de envoltorios.
<b>Polipropileno</b>	Se puede fabricar plástico tipo film con PP como película fundida.
<b>Poliéster</b>	Película de Poliéster.
<b>Nylon</b>	Poliamida de poliamida.
<b>Acetato de celulosa</b>	Bioplástico.
<b>Celofán</b>	Hecho de celulosa regenerada.
<b>Otros bioplásticos</b>	Se encuentran en estudio para su implementación.

Tabla 1 - Tipo de material empleado para fabricar plástico tipo film

El polietileno de baja densidad es el termoplástico básico con mayor volumen de utilización en embalajes tipo film. A su vez, debido a su bajo costo y facilidad para mezclar con otros polímeros y aditivos que le proporcionan flexibilidad, transparencia, brillo y resistencia, es el más utilizado para este tipo de aplicaciones [4]. Sus limitaciones son la escasa resistencia a la intemperie y a la temperatura [4].

Por lo anteriormente expuesto, en el trabajo se optó por analizar las distintas técnicas de separación y reciclaje para LDPE para luego estudiar y analizar la más conveniente.

El Polietileno es un polímero ampliamente utilizado debido a su estructura simple y bajo costo, el mismo se basa en una cadena de su monómero de Etileno y se representa como  $(CH_2-CH_2)_n$ .

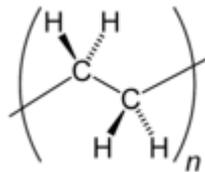


Ilustración 1 - Estructura de Polietileno

En cuanto al material crudo que ingresa como materia prima, es necesario realizar tareas de preprocesamiento, tales como limpieza, triturado, secado, entre otros. Este punto se encuentra desarrollado en la sección 5, en la cual se realiza un análisis de las características técnicas del material a ingresar como materia prima desde el punto de vista de la gestión del residuo.

# 4 ESTUDIO DEL ESTADO DE ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DISPONIBLES

---

## 4.1 Técnicas de reciclaje

Existen numerosas técnicas para reciclar diferentes tipos de materiales, en el caso de los plásticos hoy en día su reciclaje se encuentra ampliamente desarrollado bajo la técnica de reciclaje mecánico, en la cual el plástico se clasifica previamente, se separa en diferentes corrientes y es reciclada cada una por separado. Si bien esta técnica es viable y competitiva, posee algunas limitaciones tales como el número de veces que un plástico puede ser reciclado sin degradarse, o bien la capacidad para separar aditivos u otros u otras sustancias indeseadas en el producto final. A su vez, el reciclaje mecánico no es apto para todos los tipos de plásticos como poliolefinas de baja densidad. Es por esto, que esta técnica no puede actualmente reemplazar la producción de plástico virgen [5].

Esto ha obligado a desarrollar nuevas tecnologías de separación, una de ellas es el reciclaje químico, basado en la descomposición del plástico a una etapa químicamente menos compleja para luego producir el plástico nuevamente. El reciclaje químico se puede dividir en tres grandes categorías según el nivel de descomposición del plástico. Las mismas se han detallado a continuación.

### 4.1.1 Despolimerización térmica

Esta técnica es principalmente basada en la pirólisis o gasificación. Consisten en calentar plásticos y lograr reacciones de combustión, pero en ausencia de oxígeno (pirólisis) o con una pequeña concentración de oxígeno (gasificación). Es importante destacar la diferencia entre despolimerización con cracking, la despolimerización es una técnica por la cual se reducen los polímeros y producen monómeros, estos monómeros pueden nuevamente convertirse en polímeros e introducirse en el ciclo. En el caso del cracking se producen combustibles, que luego podrán sustituir combustibles tradicionales, pero en este caso ya no sería considerado reciclaje [5].

### 4.1.2 Despolimerización química

La despolimerización química se puede considerar como la reversa de la polimerización. En el proceso de polimerización se produce la “policondensación”, que se trata de unir dos moléculas de monómeros para formar el polímero. En el caso de la despolimerización química, a partir de catalizadores específicos y con la ayuda de temperatura se puede lograr el proceso inverso. No en todos los casos se lleva nuevamente al monómero original, en algunos solo se degrada el polímero a cadenas más cortas pero siempre se lleva a cabo con el polímero disuelto. Esta transformación hace que posteriormente sea más sencillo separar las impurezas para luego formar el polímero nuevamente. La técnica se puede clasificar según el tipo de disolvente utilizado [5]:

- Hidrólisis, en el caso que el solvente sea agua.
- Alcohólisis, en el caso que el solvente sea alcohol.
- Aminólisis, en el caso que el solvente sea una amina.

### 4.1.3 Purificación basada en solventes

En el caso de la purificación basada en solventes, es un proceso basado en la solubilidad selectiva de un polímero inmerso en un solvente específico. En este caso, la cadena polimérica es llevado a su forma de polímero (sin llegar a ser monómero). Esta técnica es ampliamente utilizada para embalaje alimentario debido a su buen desempeño en cuanto a pureza final obtenida y buena capacidad para remover colorantes, aditivos o contaminantes de la corriente [5].

En la siguiente tabla, se pueden observar las diferentes aplicaciones y estado de desarrollo de las diferentes técnicas de reciclaje químico.

	<b>Tipo de plástico</b>	<b>Producto</b>	<b>Descontaminación</b>	<b>Apta para mezclas de plásticos</b>	<b>Grado de desarrollo</b>
<b>Reciclaje mecánico</b>	HDPE, PET, PP, PS	Plásticos	No	Sí	Escala industrial
<b>Purificación basada en solventes</b>	PVC, PS, LDPE, PP	Polímeros	Sí	No	Escala piloto
<b>Despolimerización química</b>	PET, PU, PA, PLA, PC, PHA, PEF	Monómeros	Sí	No	Escala piloto
<b>Despolimerización térmica</b>	PMMA, PS	Monómeros	Sí	No	Escala piloto
<b>Cracking</b>	Mezcla de plásticos	Hidrocarburos	Sí	No	Escala piloto

Tabla 2 - Tipos de reciclaje químico de plásticos [5]

Como podemos observar en la tabla, la técnica que más se adecúa al tratamiento para los plásticos objeto de nuestro estudio, es la purificación basada en solventes. Esta se encuentra en un bajo grado de desarrollo, solo existen algunas plantas a escala piloto. Posteriormente, se han estudiado diferentes técnicas de reciclaje químico basado en solventes a escala laboratorio con el fin de seleccionar dos, las cuales serán objeto de estudio comparativo a lo largo del informe.

## 4.2 Técnicas de purificación basada en solventes

El objetivo de este apartado es ilustrar técnicas desarrolladas a escala laboratorio de purificación química por solventes para LDPE, nuestro polímero que conforma el plástico objeto de estudio.

En dichas técnicas se analiza el uso de dos principales solventes y su desempeño en diferentes características mencionadas a continuación:

- Porcentaje de dilución.
- Porcentaje de recuperación.
- Propiedades mecánicas luego de la purificación.
- Propiedades fisicoquímicas luego de la purificación.
- Condiciones operativas de la técnica.

Estas características van a tomarse como parámetro inicial para su posterior análisis técnico.

Dichas técnicas están realizadas a escala laboratorio y se limitan solo a las etapas de disolución, precipitación y filtración, etapas claves en el proceso de reciclaje (Tabla 3). Estas técnicas fueron obtenidas de publicaciones en la revista Elsevier® [6].

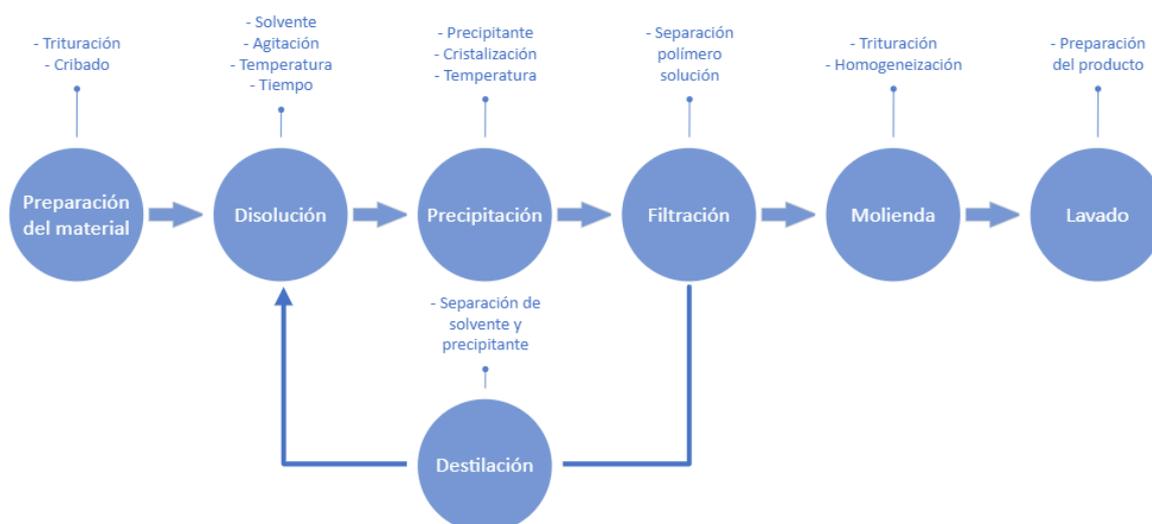


Tabla 3 - Proceso básico de dilución-precipitación

Las técnicas estudiadas pueden verse resumidas en el siguiente cuadro:

Técnica	Fuente	Solvente / Precipitante
1	Achilias et al. (2007) [7]	- Solvente: Tolueno - Precipitante: /n-hexano
2	Achilias et al. (2007) [7]	- Solvente: Xileno - Precipitante: n-Hexano
3	Hadi et al. (2012) [8]	- Solvente: Tolueno - Precipitante: n-Hexano
4	Hadi et al. (2014) [9]	- Solvente: Xileno - Precipitante: n-Hexano

Tabla 4 - Resumen técnicas de disolución/re-precipitación

#### 4.2.1 Técnicas 1 y 2

**Materiales, solventes y precipitante utilizados:** Para este estudio, se utilizaron diferentes tipos de plásticos residuales (Plástico tipo film, bolsas, envoltorios alimenticios entre otros) de LDPE. A su vez, para comparar los resultados se utilizó plástico virgen puros de LDPE. Con respecto a los disolventes utilizados, se utilizó Tolueno (Técnica 1), Xileno (Técnica 2) y n-Hexano como agente precipitante en ambas técnicas, todos de grado reactivo. [7]

**Técnica:** En el procedimiento experimental, se utilizaron para ambos casos una relación peso del plástico/volumen del disolvente de 5%. Se mezcló el solvente con el LDPE. Posteriormente el sistema se calentó durante 30 minutos a la temperatura deseada (110°C para el caso del Tolueno y 50°C, 100°C y 140°C para el caso del Xileno). Luego el matraz se enfrió a temperatura ambiente y la solución del polímero se vertió en el n-Hexano, el polímero fue re-precipitado, lavado con el mismo n-Hexano, filtrado y secado en un horno a 80°C durante 24 horas.

El polímero reciclado se obtuvo en formas de granos, la relación de solvente/no-solvente fue de 1:3 en volumen. [7]

**Medida de resultados:** La estructura de los polímeros modelo y los plásticos residuales fueron comparados antes y después de realizar la técnica mediante un espectrofotómetro FT-IR.

Con respecto a las propiedades de tracción se estudiaron en películas delgadas de los polímeros de 5mm de ancho, 0,5mm de espesor y 22mm de longitud. Se acondicionaron y se midieron valores de elasticidad, resistencia a la tracción y alargamiento en la rotura siguiendo la norma ASTM D1708-66, se analizaron 5 muestras y se obtuvo un promedio de las mediciones. [7]

**Resultados:** Con respecto a la estructura de los polímeros, tanto para los vírgenes como para los plásticos residuales se obtuvieron curvas casi idénticas, es decir altos porcentajes de recuperación, tal como se observa en la tabla número 4. También, en la misma tabla se puede observar que a medida que aumentamos la temperatura utilizando Xileno como disolvente, se obtienen mayores porcentajes de recuperación, esto por supuesto tiene el límite en su punto de ebullición, que se encuentra cercano a los 145°C.

<b>Plásticos modelo</b>			
<b>Solvente/no-solvente</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Concentración (%p/v)</b>	<b>LDPE (% de recuperación)</b>
<b>Tolueno/n-Hexano</b>	110	5	97,7
<b>Xileno/n-Hexano</b>	50	5	63,2
<b>Xileno/n-Hexano</b>	100	5	98,9
<b>Xileno/n-Hexano</b>	140	5	99,7
<b>Plásticos residuales</b>			
<b>Xileno/n-Hexano</b>	140	5	98,6 (plástico film)
<b>Xileno/n-Hexano</b>	140	5	99,6 bolsas
<b>Xileno/n-Hexano</b>	140	5	-
<b>Xileno/n-Hexano</b>	140	5	-
<b>Xileno/n-Hexano</b>	140	5	-

Tabla 5 - Porcentaje de recuperación posterior a la técnica dilución/re-precipitación

En cuanto a las propiedades mecánicas, con respecto a la resistencia a la tracción, se puede observar que tanto para los plásticos modelos, así como los reciclados, posterior al proceso de dilución/re-precipitación esta propiedad aumenta. Lo mismo ocurre con la tensión de tracción y el módulo elástico, esto podría deberse a que algunas fracciones de bajo peso molecular quedan solubles en la fase líquida y no llegan a precipitarse, precipitándose mayormente moléculas de alto peso molecular, lo cual hace aumentar los valores en estas propiedades, a la vez, la pérdida de aditivos en el plástico virgen que se pierden en la etapa de solubilización. Esto puede observarse en las tablas 5 y 6. [7]

<b>Propiedad</b>	<b>Virgen</b>	<b>Reciclado</b>
<b>Tensión de tracción a carga máxima (MPa)</b>	8,6	8,6
<b>Alargamiento de rotura (%)</b>	83	146
<b>Tensión de tracción (MPa)</b>	8,6	8,6
<b>Módulo elástico (MPa)</b>	303	360

Tabla 6 - Resistencia mecánicas luego de la disolución/re-precipitación en materiales modelos

<b>Propiedad</b>	<b>Virgen</b>	<b>Reciclado</b>
<b>Tensión de tracción a carga máxima (MPa)</b>	17,0	17,6
<b>Alargamiento de rotura (%)</b>	711	722
<b>Tensión de tracción (MPa)</b>	8,8	8,9
<b>Módulo elástico (MPa)</b>	175	182

Tabla 7 - Resistencia mecánicas luego de la disolución/re-precipitación en materiales residuales

Cómo resumen de las técnicas 1 y 2, podemos analizar que los porcentajes de recuperación para el caso del Tolueno en plástico virgen es de 97,7% y en cuanto al Xileno 99,7% para el plástico virgen y entre 98,6 y 99,6% para el LDPE residual, lo que nos demuestra un mejor desempeño en este caso el Xileno.

#### 4.2.2 Técnica 3

**Materiales, solventes y precipitante utilizados:** El polímero virgen utilizado como estándar es LDPE puro. Los polímeros residuales fueron botellas de este tipo de plástico previamente limpiados y secados. Los reactivos utilizados fueron el Tolueno y el Éter de petróleo como solventes y el n-Hexano como agente precipitante, todos de pureza grado reactivo marca Merk. [8]

**Técnica:** En primer lugar, se realizó una prueba de disolución utilizando los materiales vírgenes estándar y como solventes en su estado puro, Tolueno y Éter de petróleo (PetE) de diferentes grados (A, B y C). Por otra parte, una mezcla de Tolueno en una relación 1:1 con estos 3 diferentes Éter de petróleo y a distintas temperaturas para comprobar la disolución y la temperatura máxima a la que puede ser expuesto debido a su posible volatilización. Los resultados de esta etapa se ilustran en la siguiente tabla:

Solvente puro	Punto de ebullición del solvente (°C)	Temperatura de dilución (°C)	% de dilución
Tolueno	110	75	100
PetE(A)	40/60	60	0
PetE(B)	60/80	75	0
PetE(C)	90/120	80	100
Mezcla de solventes			
Mezcla de Solvente	Punto de ebullición del solvente (°C)	Temperatura de dilución (°C)	% de dilución
Tolueno/PetE(A)	70	70	15
Tolueno/PetE(B)	82	80	95
Tolueno/PetE(C)	105	70	100

Tabla 8 - Prueba de disolución con diferentes relaciones de solventes

Como se puede observar en la tabla, las mejores diluciones para ambos materiales se obtienen con Tolueno puro, o bien, con la mezcla de Tolueno y Éter de petróleo grado C. Esto se debe a que a mayor punto de ebullición se puede elevar más la temperatura de operación, y a su vez a mayor temperatura se obtiene una mejor dilución.

Posteriormente, se continuó con la re-precipitación utilizando las soluciones que utilizaron Tolueno puro como solvente y el n-hexano como agente precipitante, debido a su menor complejidad, precio y alto rendimiento de dilución obtenido.

En cuanto a las condiciones operativas de la técnica completa, los polímeros fueron previamente lavados y cortados en piezas de entre 2 y 4 centímetros. La técnica se llevó a cabo a agitación constante, medición de temperatura y un condensador ensamblado. La temperatura fue controlada por un baño de aceite y se lo expuso durante 30 minutos. Luego de la dilución el material fue filtrado por un filtro del rango de 20-70mm y luego el n-Hexano fue añadido a la solución filtrada. Posteriormente, el polímero fue limpiado con el mismo n-Hexano y secado en un horno de vacío durante 10-15 horas a 60°C. El polímero resultante fue obtenido en forma de granos la relación solvente/polímero fue en todos los casos de 1:15% peso/volumen, y la relación solvente/no-solvente fue de 1:3 volumen en volumen.

**Medida de resultados:** La medida de las propiedades térmicas del polímero virgen estándar y del residuo antes y después del reciclaje se realizaron mediante el equipo DSC Q1000 V9.6 para obtener el punto de fusión y un FTIR para medir la cristalinidad de estos. En la siguiente tabla, pueden observarse los puntos de fusión y % de cristalinidad del plástico virgen estándar y de los dos plásticos residuales, es decir, antes y luego del proceso de dilución/re-precipitación. [8]

<b>Polímero</b>	<b>Punto de fusión (°C)</b>			<b>Cristalinidad (%)</b>		
	<i>Virgen (Estándar)</i>	<i>Residuo</i>	<i>Residuo reciclado</i>	<i>Virgen (Estándar)</i>	<i>Residuo</i>	<i>Residuo reciclado</i>
<b>LDPE</b>	106	105,37	109,6	52	24,3	44,1

Tabla 9 - Resultados de punto de fusión y cristalinidad utilizando Tolueno como solvente y n-Hexano como precipitante

**Resultados:** Tal como puede observarse en la tabla 9, no existe una variación considerable en los puntos de fusión en los tres casos. En cuanto a la cristalinidad, se puede ver que hay una variación entre el residuo previo y posterior a ser reciclado. Incluso, la cristalinidad del residuo reciclado se acerca más al polímero utilizado como estándar que el residuo utilizado para esta técnica.

Como conclusión de esta técnica, podemos afirmar por un lado que el Tolueno encuentra un buen desempeño en la dilución del LDPE. Por otro lado, se puede concluir que utilizando n-Hexano como agente precipitante, las propiedades térmicas son similares a las del plástico antes de reciclar y en cuanto a la cristalinidad incluso mejores que el plástico residual previo al reciclaje.

#### 4.2.3 Técnica 4

En este caso, la técnica es similar a la anterior con la diferencia que, en vez de utilizar Tolueno como solvente principal, se utilizó Xileno. Se realizó primero un estudio de cómo se comporta el Xileno puro y mezclado con tres diferentes Éteres de petróleo y posteriormente un estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los cristales reciclados.

**Materiales, solventes y precipitante utilizados:** El polímero virgen utilizado como estándar es LDPE puro. Los polímeros residuales fueron diferentes tipos de plásticos tales como bolsas, plásticos tipo film, envoltorios de alimentos de LDPE. Con respecto a los solventes, se utilizó como se mencionó anteriormente Xileno y el Éter de petróleo de tres diferentes grados y n-Hexano como no solvente, todos de pureza grado reactivo marca Sigma-Aldrich y Merk. [9]

**Técnica:** Tal como se realizó en el ensayo anterior, primero se realizó una prueba de dilución con Xileno puro y mezcla de Xileno y diferentes Éter de petróleo (PetE) en relación Xileno/PetE de 25:75, 50:50, 75:25 y 90:10 volumen en volumen, los resultados de este análisis pueden observarse en la tabla a continuación:

Solvente, relación (v:v)	Temperatura de dilución (°C)	Porcentaje de dilución
<b>Xileno puro</b>	75	99,4
<b>Xileno/PetE(A)</b>		
<b>25:75</b>	68	49
<b>50:50</b>	89	97
<b>75:25</b>	100	99
<b>90:10</b>	100	99
<b>Xileno/PetE(B)</b>		
<b>25:75</b>	80	90
<b>50:50</b>	67	99
<b>75:25</b>	75	99
<b>90:1</b>	75	99
<b>Xileno/PetE(C)</b>		
<b>25:75</b>	80	99
<b>50:50</b>	70	98
<b>75:25</b>	70	98
<b>90:10</b>	75	99

Tabla 10 - Prueba de disolución con diferentes relaciones de solventes

Tal como puede observarse en la tabla 9, la mejor performance teniendo en cuenta ambos polímeros se obtiene utilizando como solvente Xileno puro.

Con respecto a las condiciones operativas de la técnica completa, la prueba se realizó en la proporción de polímero/solvente 1:40 peso/volumen. Las piezas del polímero fueron de entre 2 y 4 centímetros, y la técnica fue llevada a cabo en un balón de 3 cuellos con un condensador acoplado, un termómetro y agitación constante. La temperatura fue controlada mediante un baño de aceite, la dilución se llevó a cabo durante 30 minutos. Una vez disuelto completamente, el material fue enfriado durante 15-30 minutos y vertida al n-Hexano, luego filtrada mediante un filtro de 20-70mm y secada a 70°C en un horno al vacío durante 10-15 horas. La relación de solvente/no-solvente utilizado fue de 1:4 en volumen.

**Medida de resultados:** La medida de las propiedades térmicas del polímero virgen estándar, el residuo antes y después del reciclaje se realizaron mediante el equipo DSC Q1000 V9.6 para obtener el punto de fusión y un FTIR para medir la cristalinidad de estos. En la siguiente tabla, pueden observarse los puntos de fusión y % de cristalinidad del plástico virgen estándar y de los dos plásticos residuales, es decir, antes y luego del proceso de dilución/re-precipitación. [9]

<b>Muestra</b>	<b>Polímero</b>	<b>Punto de fusión (°C)</b>			<b>Cristalinidad (%)</b>		
		<i>Virgen (Estándar)</i>	<i>Residuo</i>	<i>Residuo reciclado</i>	<i>Virgen (Estándar)</i>	<i>Residuo</i>	<i>Residuo reciclado</i>
<b>Bolsas/plástico tipo film</b>	<i>LDPE</i>	106	106	110	52	24,3	44,1

Tabla 11 - Resultados de punto de fusión y cristalinidad utilizando Xileno y n-Hexano

**Resultados:** Tal como puede observarse en la tabla 10, no existe una variación considerable en los puntos de fusión en los tres casos. En cuanto a la cristalinidad, se puede ver que hay una variación entre el residuo previo y posterior a ser reciclado. Incluso, la cristalinidad del residuo reciclado se acerca más al polímero utilizado como estándar que el residuo utilizado para esta técnica. Esto se asemeja mucho a los resultados obtenidos con la técnica anteriormente estudiada.

Con esto podemos concluir que el Xileno presenta, algo menor que el Tolueno en la técnica 3, un porcentaje de dilución del LDPE de 99,4%. Por otro lado, podemos observar tal como en la técnica 3 que utilizando n-Hexano como agente precipitante, las propiedades térmicas son similares a las del residuo original y en el caso de la cristalinidad los resultados obtenidos son incluso mejores que en el LDPE previo a su reciclaje.

#### 4.2.4 Conclusiones de técnicas

En la siguiente tabla se puede observar un resumen de los parámetros observados y sus resultados obtenidos en las diferentes técnicas con el uso de los dos diferentes solventes (Tolueno y Xileno) y un mismo agente precipitante (n-Hexano).

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica de estudio</b>	<b>Tolueno/n-Hexano</b>	<b>Xileno/n-Hexano</b>
<i>Recuperación (%)</i>	<i>Técnicas 1 y 2</i>	<i>97,7</i>	<i>98,6-99,7</i>
<i>Dilución (%)</i>	<i>Técnica 3 y 4</i>	<i>100</i>	<i>99,4</i>
<i>Resistencia mecánica</i>	<i>Técnicas 1 y 2</i>	<i>Similares o mejores al residuo previo al reciclado</i>	<i>Similar o mejores al residuo previo al reciclado</i>
<i>Propiedades térmicas</i>	<i>Técnica 3 y 4</i>	<i>Similar al residuo previo al reciclado</i>	<i>Similar al residuo previo al reciclado</i>
<i>Cristalinidad</i>	<i>Técnica 3 y 4</i>	<i>Mejores al residuo previo al reciclado</i>	<i>Mejores al residuo previo al reciclado</i>

Tabla 12 - Resumen de resultados de técnicas

En la tabla 12, se resumen las conclusiones de cada una de las técnicas en el uso de Tolueno y Xileno como solventes y al n-Hexano como agente precipitante en ambos casos. En cuanto a las conclusiones de este capítulo, se puede decir que ambos poseen un desempeño técnico similar, teniendo en cuenta que ambos son a escala laboratorio.

Por ello se requiere un análisis más profundo para seleccionar la más conveniente. Por esto mismo, para estas dos alternativas se van a plantear un diseño básico y posteriores análisis comparativos ambientales y económicos.

Es importante destacar, que en las publicaciones ilustradas en este capítulo no se analizan estudios a escala piloto o industrial y sus posibles restricciones. Por lo que esto se tomó como una limitación en el análisis técnico mencionado en el alcance del trabajo.

En resumen, se estudiarán dos técnicas de “Purificación química basada en solventes utilizando dos diferentes solventes y un mismo agente precipitante”, Tolueno y Xileno como solventes y n-Hexano como agente precipitante.

## 5 DISEÑO BÁSICO DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

---

Una vez estudiado y valorado el estado del arte de esta tecnología y las dos técnicas propuestas para el análisis comparativo se llevó a cabo un escalado.

Es importante para su pretratamiento, estudiar de qué manera ingresará la materia prima a la planta, para ello se obtuvieron imágenes provistas por la dirección de EDIFESA. El plástico tipo film, separado mecánicamente de otros tipos de plástico, ingresará en zunchos de aproximadamente 1 metro cúbico tal como se puede observar en la siguiente ilustración:



Ilustración 2 - Ingreso de materia prima

La capacidad de tratamiento de la planta se fijó en 20.000 toneladas año de material a reciclar. Este caudal se encuentra justificado debido a que es el plástico tipo film obtenido posterior a la separación mecánica de plásticos en el centro Montemarca-Cónica de la ciudad de Sevilla, el cual ingresaría en la planta objetivo de este estudio. Este dato se obtuvo de una fuente proveniente del mismo centro de reciclaje.

En cuanto a las condiciones de recepción del material, se utilizaron como guía los criterios de calidad de la planta de selección de envases ligeros de Ecoembes, para obtener datos de pureza del material. [10]

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA MATERIALES RECUPERADOS (ETMR)            DE RESIDUOS DE ENVASES DE PLÁSTICO FILM            EN PLANTAS DE SELECCIÓN DE ENVASES LIGEROS. Tabla 3</b>	
Material solicitado	Envases flexibles de film (bolsas y films de embalaje, incluido el film extensible y el film retráctil) procedentes de recogida selectiva $\geq 82,00\%$ (incluidas las etiquetas que formen parte del envase tras el prensado).
Impuros	Impropios $< 18,00\%$ con límite máximo para las siguientes fracciones de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• PET <math>&lt; 1,00\%</math></li> <li>• cauchos siliconas, espumas de poliestireno y poliuretano <math>&lt; 0,05\%</math></li> <li>• metales <math>&lt; 1,50\%</math></li> <li>• papel/cartón, cartón bebidas/alimentos (brik) <math>&lt; 2,50\%</math></li> <li>• otras impurezas <math>&lt; 9,00\%</math></li> <li>• Humedad <math>&lt; 5,00\%</math></li> </ul>
Condiciones de entrega	En balas de longitud: $1,00 \leq L \leq 1,50$ m y densidad $\geq 250,00$ kg/m <sup>3</sup> Fleje de las balas: acero La integridad de las balas debe mantenerse a lo largo de la carga, transporte, descarga y almacenamiento. Envío: camión completo (mínimo 15,00 toneladas)

Ilustración 3 - Especificaciones materia prima [10]

Para realizar el diseño básico y equipos principales del proceso, se realizó una búsqueda bibliográfica de diferentes patentes de procesos similares, en las cuales se emplea el uso de solventes y agentes precipitantes. Si bien, no se cuenta con la información precisa de los solventes que se utilizan ni el diseño avanzado del proceso, podemos encontrar patentes como CreaSolv<sup>®</sup>, VinyLoop<sup>®</sup>, PureCycle<sup>™</sup>, que son procesos de purificación basada en solventes para diferentes tipos de polímeros.

En estas técnicas, tal como se puede observar en las ilustraciones siguientes, poseen una etapa de dilución, posteriormente un filtro previo a la precipitación. Luego para la separación del solvente y el agente precipitante se utiliza una destilación en la cual separa a estos por punto de ebullición.

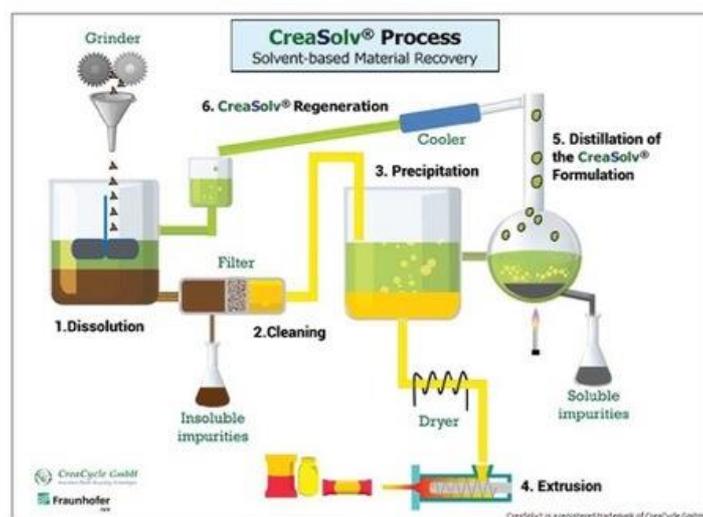


Ilustración 4 - Proceso CreaSolv<sup>®</sup>

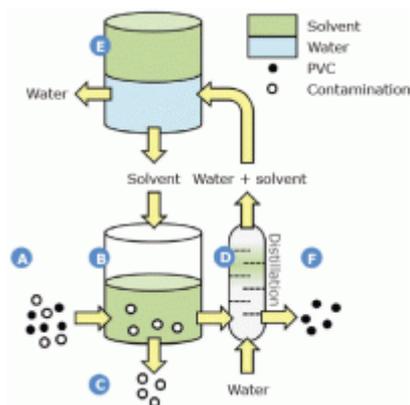


Ilustración 5 - Proceso VinyLoop®

En este caso particular, al no tener el proceso completo de ninguna patente se optó por desarrollar un diagrama del proceso de elaboración propia, utilizando el software libre “diagrams.net”.

Las etapas del proceso principalmente pueden separarse en tres:

- Primera etapa – Preparación de la materia prima
  - Almacenamiento de materia prima
  - Triturado de materia prima
  - Limpieza con tamices
  - Limpieza con detergente
  - Desinfección
  - Limpieza de tinta y colas
  - Secado de materia prima
- Segunda etapa – Dilución y Re-precipitación
  - Dilución
  - Filtrado
  - Precipitación
- Tercera etapa – Separación de solvente/agente precipitante y Acondicionado de producto final
  - Separación mediante columna de destilación de solvente y agente precipitante
  - Secado de producto final
  - Triturado de producto final

En cuanto a los equipos del proceso y la configuración, en ambas alternativas es la misma. Lo que cambiará en el proceso son las condiciones de operación y el solvente que se utilizará para cada caso.

## 5.1 Alternativa A – Utilización de Tolueno como solvente

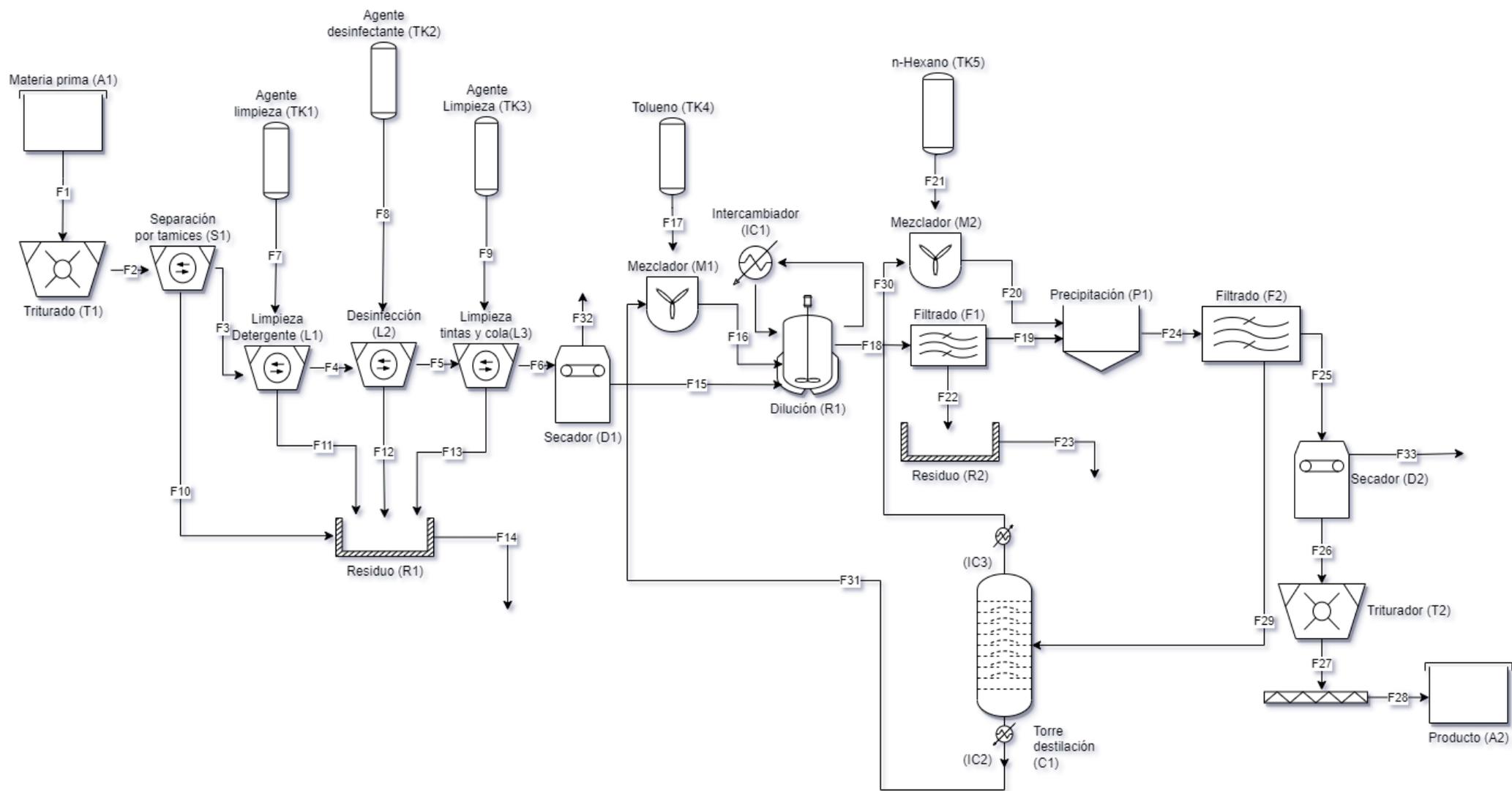


Ilustración 6 - Diagrama de flujo de proceso utilizando Tolueno como solvente

## 5.1.1 Descripción del proceso – Alternativa A (Tolueno como solvente)

### Acondicionamiento de la materia prima

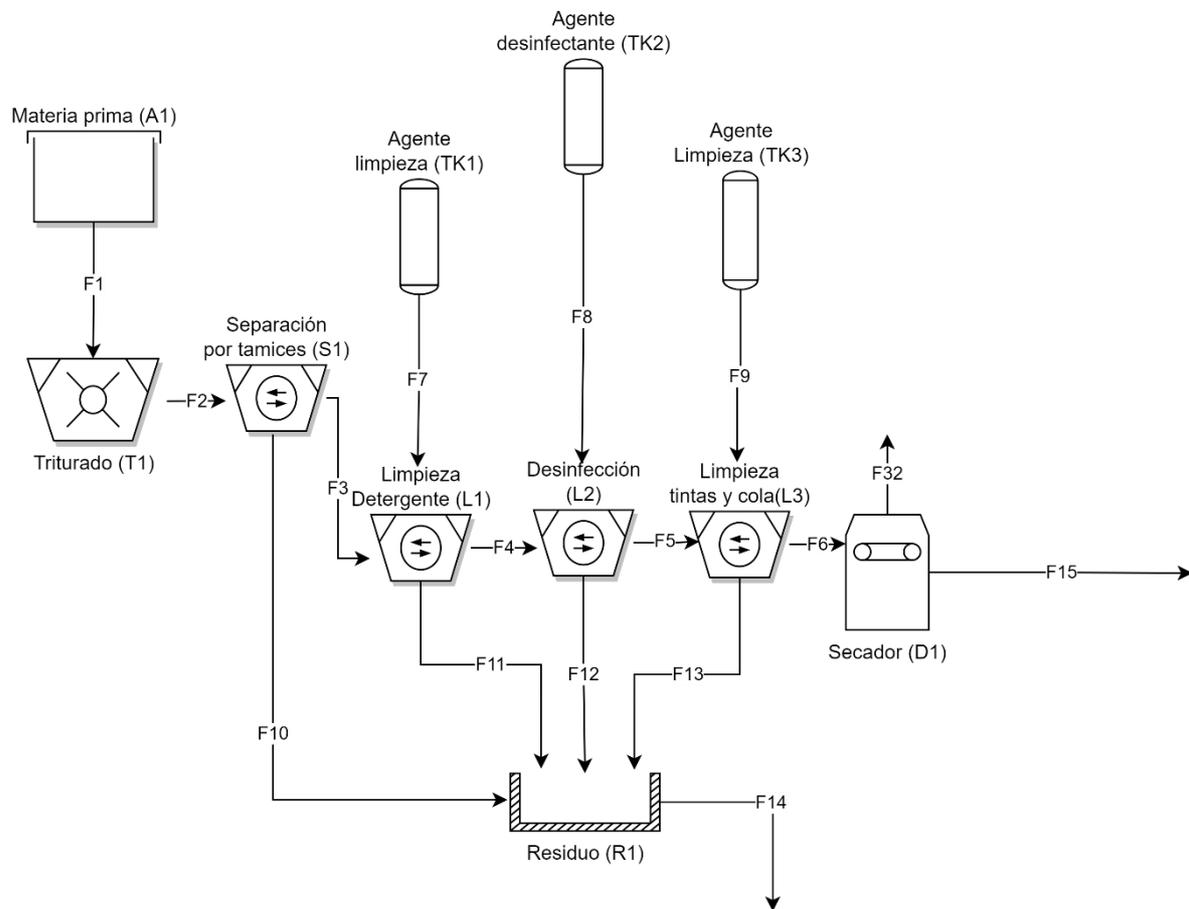


Ilustración 7 - Acondicionamiento materia prima - Alternativa A

La materia prima ingresa en zunchos de aproximadamente 1 metro cúbico, se acondicionan en un depósito de almacenamiento (A1) para luego ser alimentado con autoelevador a la trituradora T1, posteriormente la corriente ya triturada con un diámetro menor a 5 centímetros ingresa al equipo (S1) en el cual se realiza una separación por tamices, eliminando corriente de impurezas de menor tamaño.

Posteriormente, la corriente ingresa al tanque de limpieza L1 en el cual entra en contacto con un detergente de limpieza para realizar una limpieza química de aceites y grasas. Seguidamente, ingresa al equipo de desinfección (L2) en el cual se eliminan microorganismos y patógenos que pueda contener el residuo.

Luego, en la última etapa de limpieza se le retiran finalmente, tintas y colas que pueda poseer el plástico con un solvente de limpieza de grado industrial en el equipo (L3). Por último, se realiza un secado eliminando el agua y restos de solventes en el equipo (D1).

Esta etapa genera una única corriente de residuos R1 que será tratada y dispuesta según como lo indique la gestión de residuos correspondiente de la planta.

## Dilución

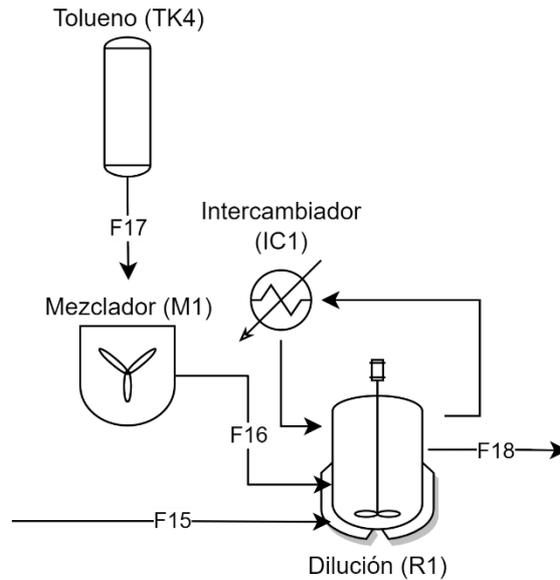


Ilustración 8 - Etapa dilución - Alternativa A

La corriente de salida del secador ingresa mediante una banda transportadora al reactor de dilución R1 en el cual se mezcla con la corriente del agente solvente, en este caso Tolueno y se produce la dilución. Este tolueno proviene de un mezclador M1 en el cual se mezcla una corriente proveniente de la columna de destilación C1 (explicada posteriormente) con una corriente de Tolueno puro proveniente del tanque de materia prima TK4, este va a dosificarse de manera tal de reemplazar el Tolueno que se pierda por fugas inherentes al proceso.

## Precipitación

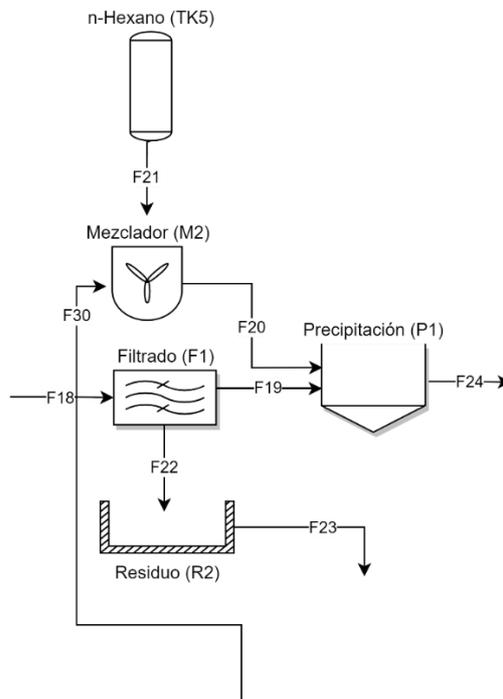


Ilustración 9 - Filtrado y precipitación - Alternativa A

La corriente que sale del reactor R1, ingresa a un filtro en el cual se separan impurezas insolubles, para que luego en la etapa posterior de precipitación solo tengamos el polímero deseado, de aquí se obtiene el residuo R2 que también será tratado según lo indique la gestión de residuos de la planta. Una vez que la corriente se encuentra filtrada, ingresa al precipitador P1, en el cual se pone en contacto con el agente precipitante, en este caso el n-Hexano. El n-Hexano proviene de un tanque de mezcla en el cual se compone de dos corrientes, una proveniente de la cabeza de la torre de destilación C1 (explicada posteriormente), y otra que aporta n-Hexano nuevo del tanque de materias primas TK5, esto al igual que con el Tolueno es para mitigar las fugas inherentes al proceso.

#### Acondicionamiento del producto

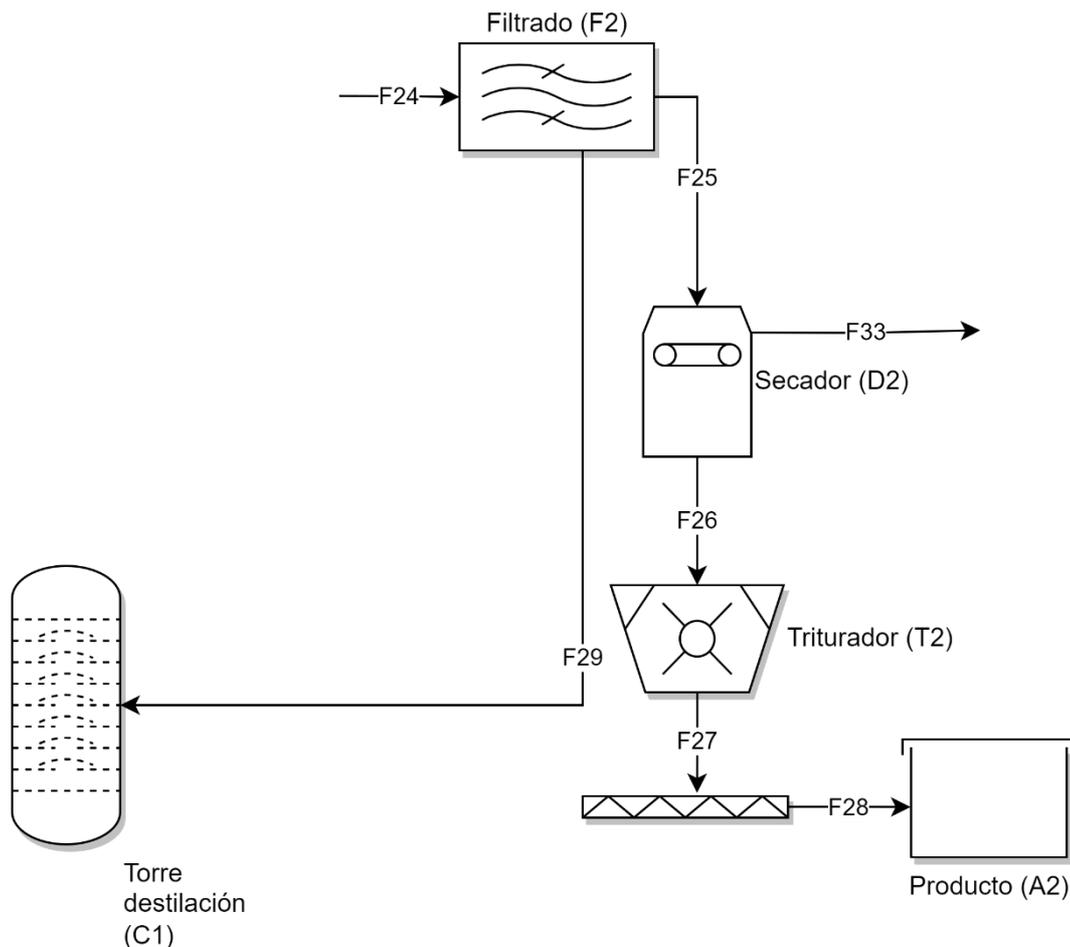


Ilustración 10 - Acondicionamiento del producto - Alternativa A

La corriente de salida del precipitador P1 pasa por un segundo filtro F2, el cual separa la mezcla de solventes con el polímero ya solidificado. De este filtro salen dos corrientes, la corriente líquida se irá a la columna de destilación C1 que separará los agentes solventes y precipitantes por su punto de ebullición, en el caso del polímero ya solidificado pasará por un secador D2 para quitarle todo el resto de solvente y humedad que pueda contener. Una vez seco, la corriente ingresa al triturador T2 que disminuirá el tamaño de los granos a un diámetro menor o igual a 1 centímetro para luego ser trasladado mediante cintas transportadoras al contenedor de Producto A2.

## Separación de solvente y agente precipitante

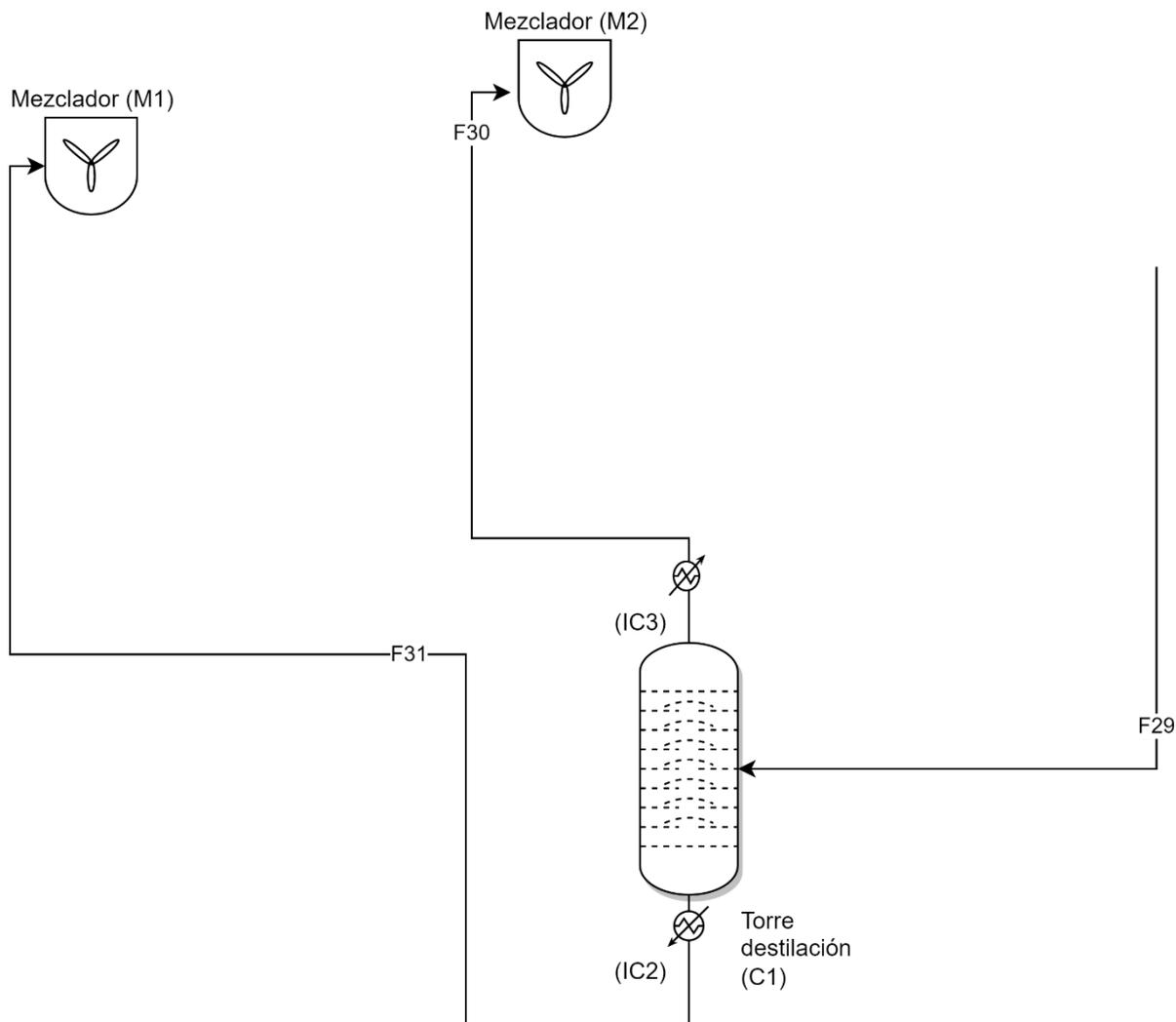


Ilustración 11 - Columna destilación - Alternativa A

Por último, la corriente proveniente del filtro F2 previamente mencionada, ingresa a la columna de destilación C1 con el objeto de separar por el fondo el diluyente (Tolueno) y por cabeza el precipitante (n-Hexano). Estas luego ingresarán a los mezcladores M1 y M2 para incorporarse nuevamente al proceso.

### 5.2 Alternativa B – Utilizando Xileno como solvente

Como se mencionó al comienzo del capítulo el diagrama de flujo es similar, lo que cambia son las condiciones de operación y el solvente utilizado para la dilución, que se verá analizado en el capítulo siguiente.

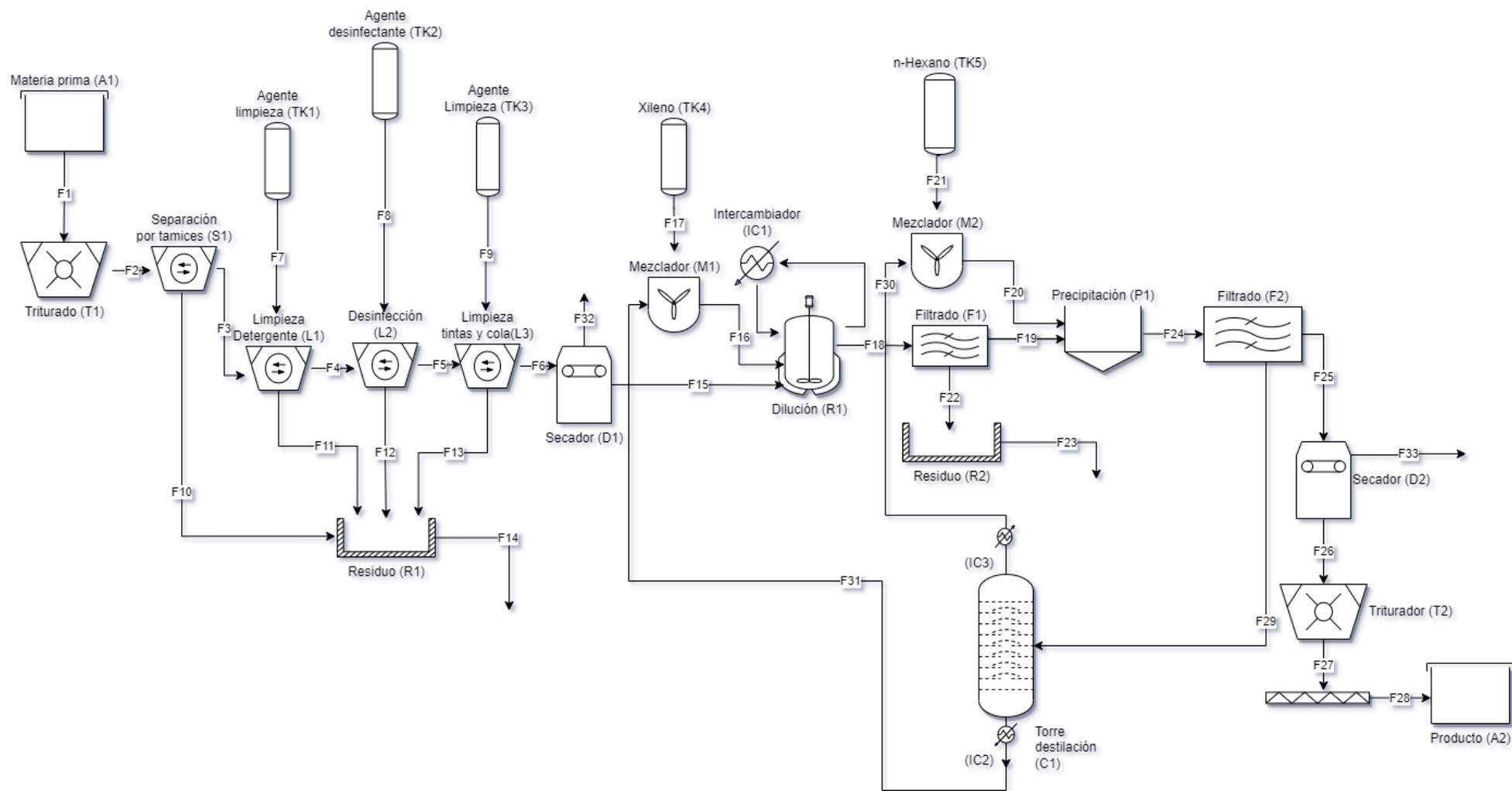


Ilustración 12 - Diagrama de flujo de proceso utilizando Xileno como solvente

## 5.1.2 Descripción del proceso – Alternativa B (Xileno como solvente)

### Acondicionamiento de la materia prima

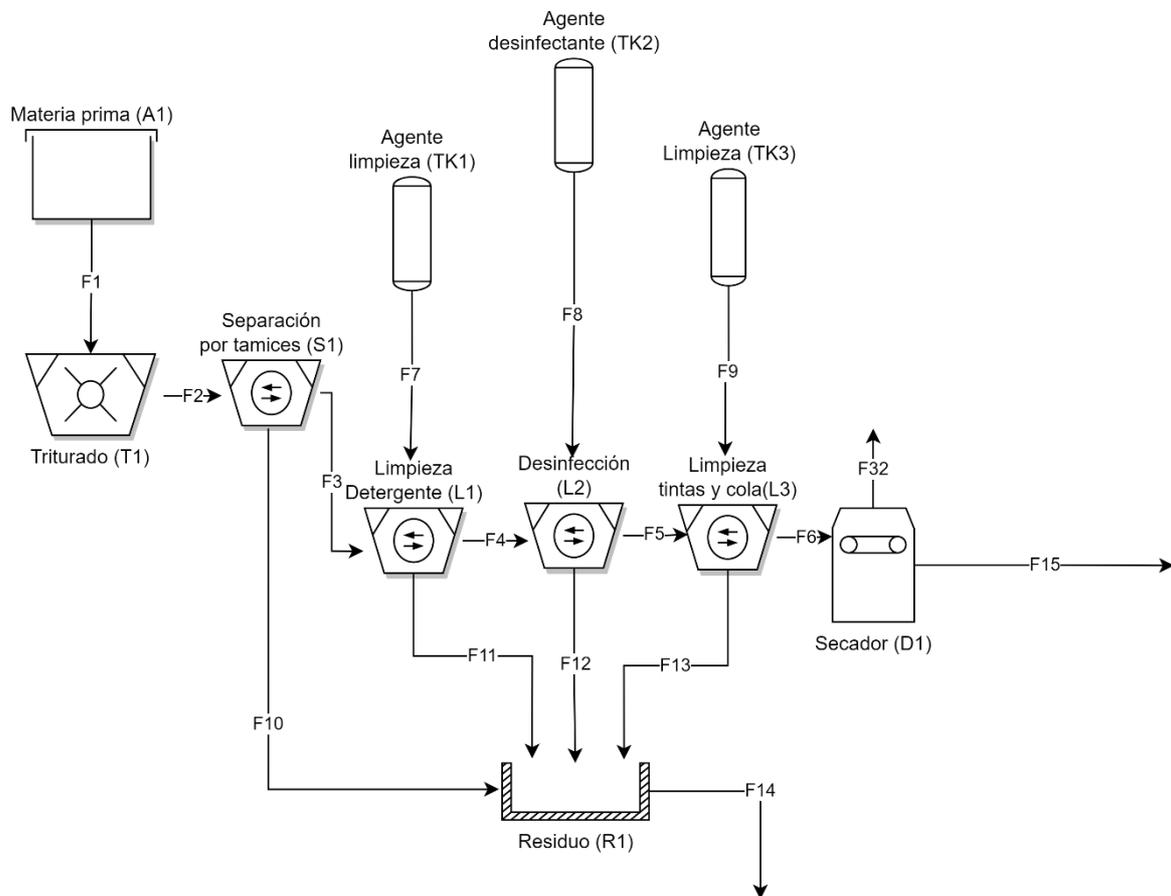


Ilustración 13 - Acondicionamiento materia prima - Alternativa B

La materia prima ingresa en zunchos de aproximadamente 1 metro cúbico, se acondicionan en un depósito de almacenamiento (A1) para luego ser alimentado con autoelevador a la trituradora T1, posteriormente la corriente ya triturada con un diámetro menor a 5 centímetros ingresa al equipo (S1) en el cual se realiza una separación por tamices, eliminando corriente de impurezas de menor tamaño.

Posteriormente, la corriente ingresa al tanque de limpieza L1 en el cual entra en contacto con un detergente de limpieza para realizar una limpieza química de aceites y grasas. Seguidamente, ingresa al equipo de desinfección (L2) en el cual se eliminan microorganismos y patógenos que pueda contener el residuo.

Luego, en la última etapa de limpieza se le retiran finalmente, tintas y colas que pueda poseer el plástico con un solvente de limpieza de grado industrial en el equipo (L3). Por último, se realiza un secado eliminando el agua y restos de solventes en el equipo (D1).

Esta etapa genera una única corriente de residuos R1 que será tratada y dispuesta según como lo indique la gestión de residuos correspondiente de la planta.

## Dilución

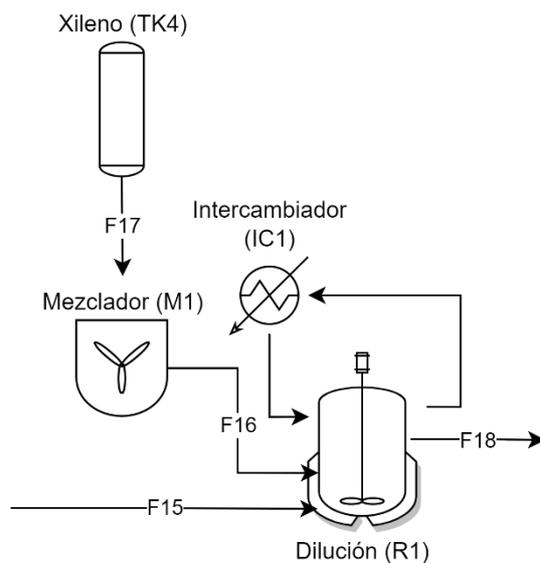


Ilustración 14 - Etapa dilución - Alternativa B

La corriente de salida del secador ingresa mediante una banda transportadora al reactor de dilución R1 en el cual se mezcla con la corriente del agente solvente, en este caso Xileno y se produce la dilución. Este Xileno proviene de un mezclador M1 en el cual se mezcla la corriente proveniente del fondo de la columna de destilación C1 (explicada posteriormente) con una corriente de Xileno puro proveniente del tanque de materia prima TK4, este va a dosificarse de manera tal de reemplazar el Xileno que se pierda por fugas inherentes al proceso.

## Precipitación

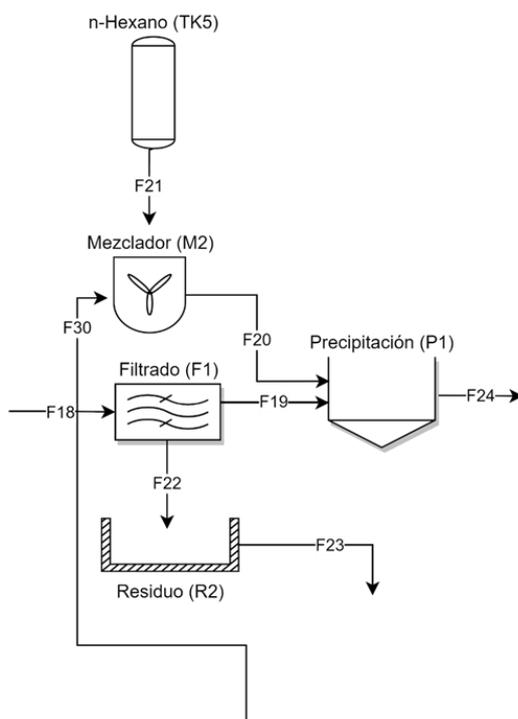


Ilustración 15 - Filtrado y precipitación - Alternativa B

La corriente que sale del reactor R1, ingresa a un filtro en el cual se separan impurezas insolubles, para que luego en la etapa posterior de precipitación solo tengamos el polímero deseado, de aquí se obtiene el residuo R2 que también será tratado según lo indique la gestión de residuos de la planta. Una vez que la corriente se encuentra filtrada, ingresa al precipitador P1, en el cual se pone en contacto con el agente precipitante, en este caso el n-Hexano. El n-Hexano proviene de un tanque de mezcla en el cual se compone de dos corrientes, una proveniente de la cabeza de la torre de destilación C1 (explicada posteriormente), y otra que aporta n-Hexano nuevo del tanque de materias primas TK3, esto al igual que con el Xileno es para mitigar las fugas inherentes al proceso.

### Acondicionamiento del producto

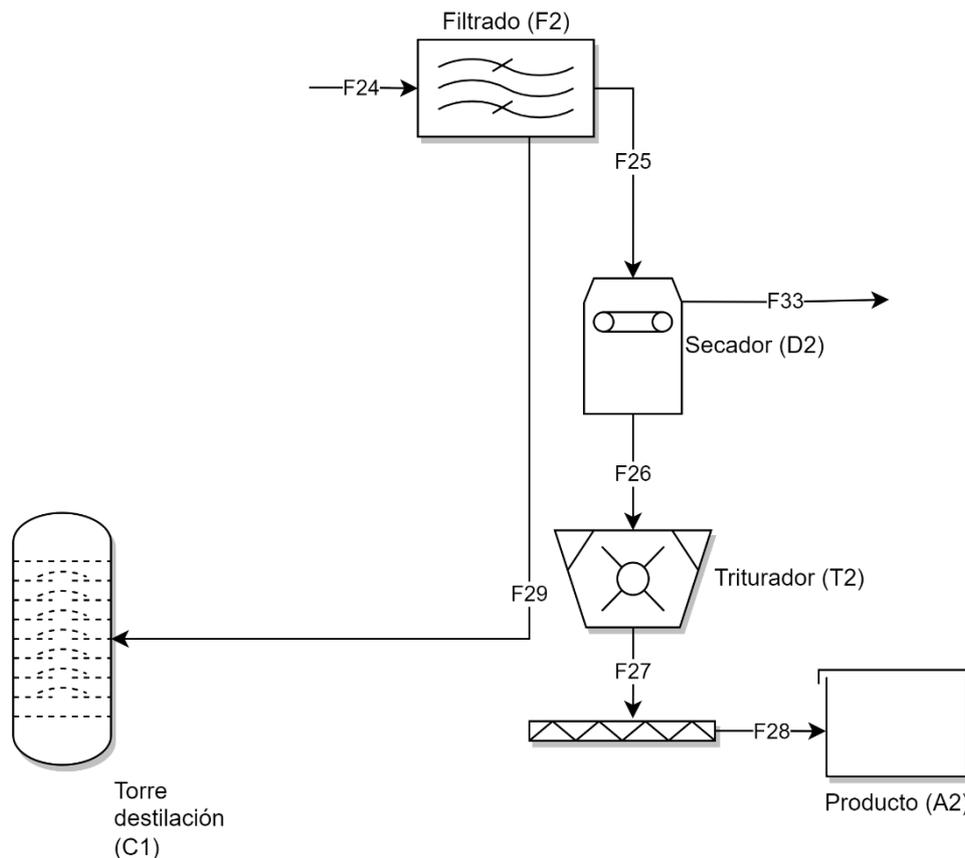


Ilustración 16 - Acondicionamiento del producto - Alternativa B

La corriente de salida del precipitador P1 pasa por un segundo filtro F2, el cual separa la mezcla de solventes con el polímero ya solidificado. De este filtro salen dos corrientes, la corriente líquida se irá a la columna de destilación C1 que separará los agentes solventes y precipitantes por su punto de ebullición, en el caso del polímero ya solidificado pasará por un secador D2 para quitarle todo el resto de solvente y humedad que pueda contener. Una vez seco, la corriente ingresa al triturador T2 que achicará el tamaño de los granos a un diámetro menor o igual a 1 centímetro para luego ser trasladado mediante cintas transportadoras al contenedor de Producto A2.

Separación de solvente y agente precipitante

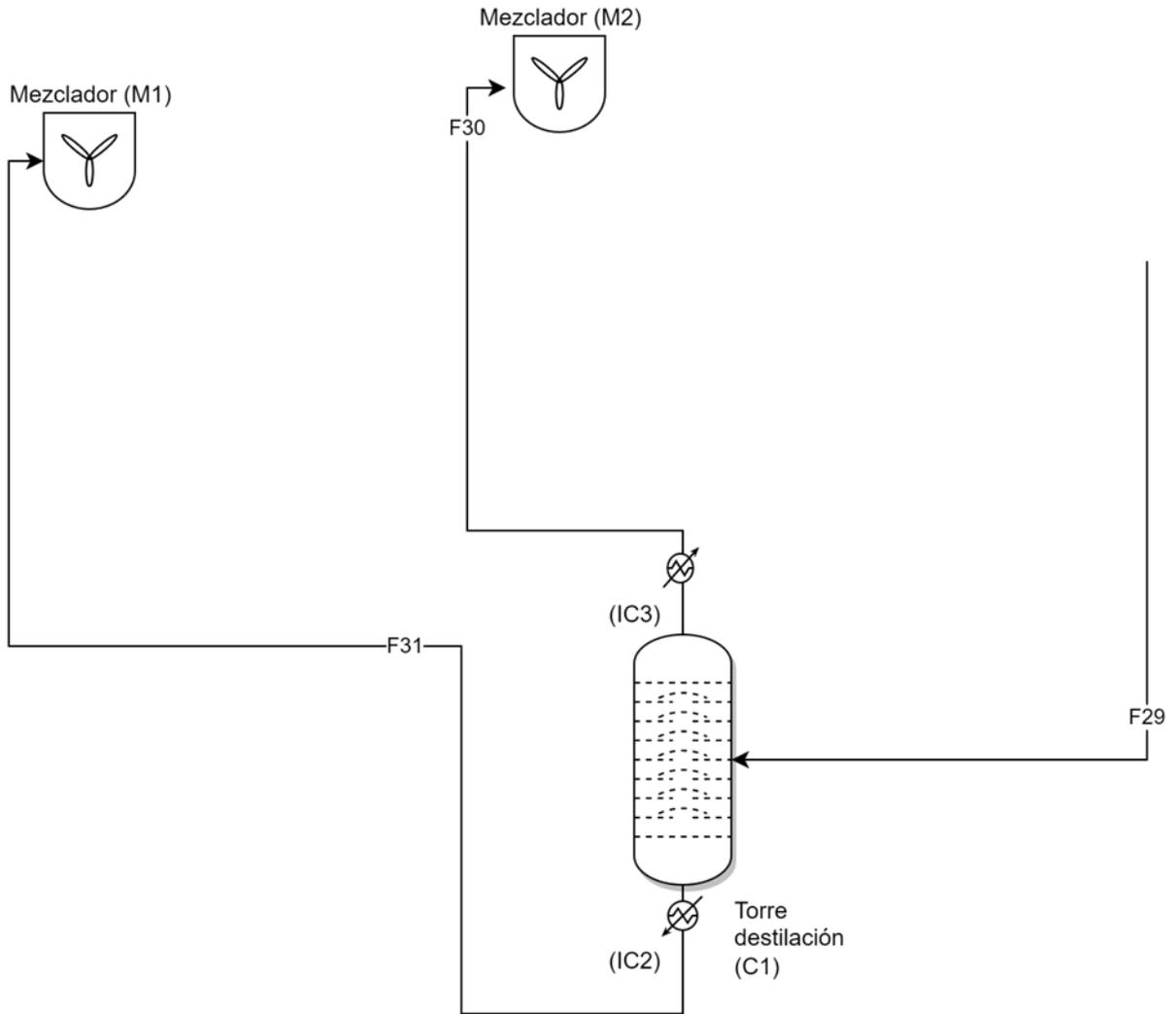


Ilustración 17 - Columna destilación - Alternativa B

Por último, la corriente proveniente del filtro F2 previamente mencionada, ingresa a la columna de destilación C1 con el objeto de separar por el fondo el diluyente (Xileno) y por cabeza el precipitante (n-Hexano). Estas luego ingresarán a los mezcladores M1 y M2 para incorporarse nuevamente al proceso.

# 6 ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

En el siguiente capítulo se realizó mediante elaboración propia el balance de masa y energía de las alternativas propuestas. Para realizar el balance de masa se utilizó la herramienta Excel, para realizar la simulación de la torre de destilación, se utilizó la herramienta libre “ChemSep”. Es importante destacar que para realizar el diseño básico se supuso una separación perfecta en una única torre de destilación, en un posterior diseño riguroso deberá tenerse en cuenta un tren de columnas debido a la dificultad de separación de estos compuestos.

## 6.1 Balance de materia

Para realizar el balance de materia se realizaron las suposiciones que se detallan en la tabla a continuación:

Equipo	Suposición
<b>Separación por tamices (S1)</b>	Se eliminan el 50% en peso de las impurezas
<b>Limpieza con detergente (L1)</b>	Se eliminan un 5% en peso de las impurezas
<b>Desinfección (L2)</b>	Se eliminan un 5% en peso de las impurezas
<b>Limpieza de tintas y colas (L3)</b>	Se eliminan un 5% en peso de las impurezas
<b>Secador (D1)</b>	Se elimina un 100% de líquidos de la corriente de ingreso
<b>Filtrado (F1)</b>	En el retenido del filtrado, queda adherido un 15% en masa del solvente proveniente de la dilución
<b>Filtrado (F2)</b>	En el retenido del filtrado, queda adherido un 7,5% en masa del solvente y un 7,5% en masa del agente precipitante.
<b>Columna (C1)</b>	La separación de solvente y agente precipitante es completa
<b>Secador (D2)</b>	Se elimina un 100% de líquidos de la corriente de ingreso
<b>Secador (D1 y D2)</b>	Para la eficiencia del secador, se adopta un 70% [11]

Tabla 13 - Suposiciones del diseño básico para ambas alternativas

### 6.1.1 Balance de materia alternativa A – Utilización de Tolueno como solvente

Para realizar el balance de materia se dividió el proceso en 3 etapas. La primera etapa involucra el acondicionamiento de la materia prima, en la segunda se centra en la dilución, precipitación y filtrado. Por último, la tercera etapa implica el acondicionamiento del producto final, así como también la torre de destilación para la recuperación de reactivos implicados en el proceso. Se puede ver en el siguiente diagrama las distintas etapas implicadas.

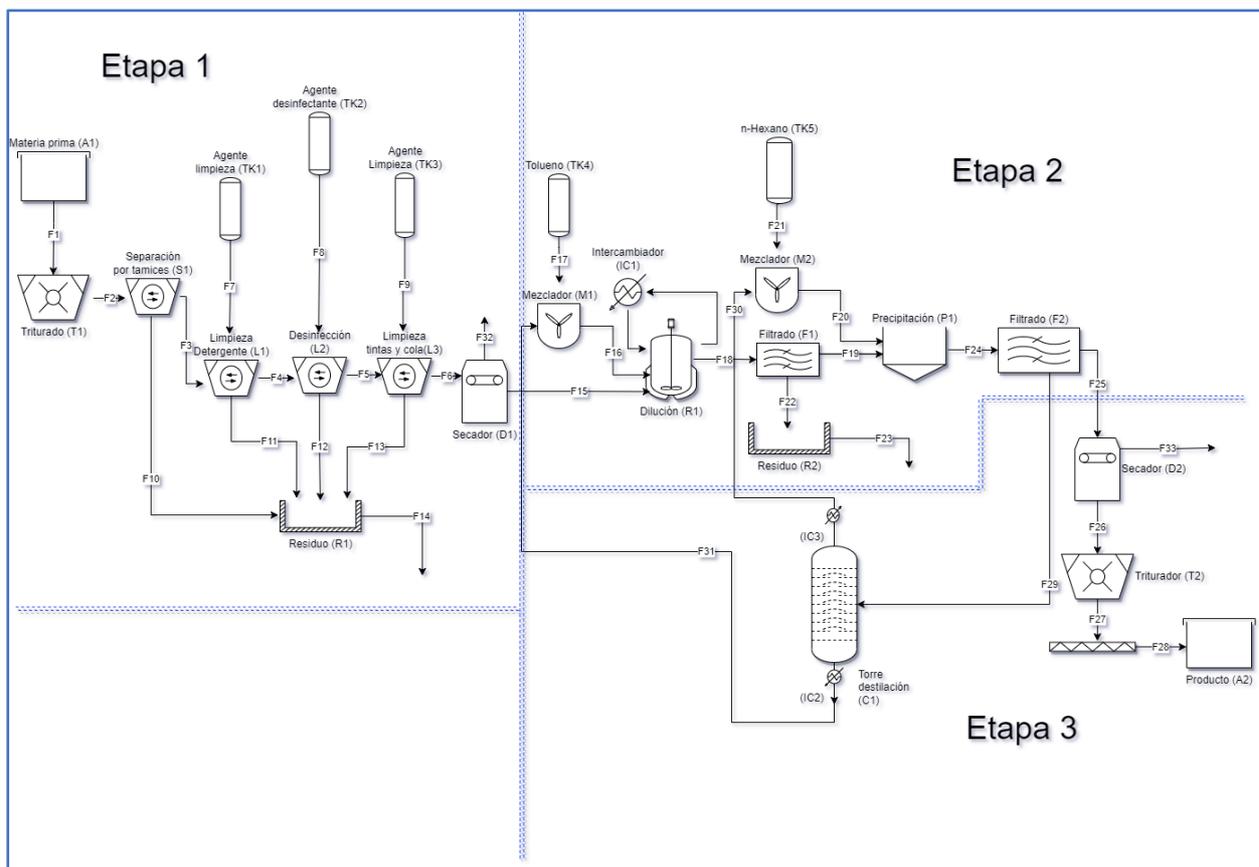


Ilustración 18 - Etapas proceso Alternativa A

A continuación, se especifican el orden de las sustancias involucradas en el proceso y las referencias de la nomenclatura correspondiente al cálculo de los flujos de las corrientes del proceso y sus respectivas composiciones.

Orden de las sustancias:

Nº	Sustancia del proceso
1	LDPE
2	Impurezas
3	Tolueno
4	n-Hexano
5	Detergente Industrial
6	Hipoclorito de Sodio
7	Agua

Tabla 14 - Orden y nomenclatura de las sustancias implicadas en el proceso

Nomenclatura:

$F_j$ : Caudal másico total de la corriente  $j$  [kg/hr].

$W_{i,j}$ : Caudal másico del componente  $i$  en la corriente  $j$  [kg/h].

$X_{i,j}$ : Fracción másica del componente  $i$  en la corriente  $j$  [kg/kg].

## Etapa I

En nuestra etapa inicial, el caudal de materia prima es 20.000 toneladas año, o bien teniendo en cuenta 300 días operativos al año, una operación continua de tres turnos, con un 80% de horas operativas (debido a paradas programadas, cambios de turno, etc.) hace un total de 3.472 kg/hr. Para este trabajo, se realizó con una estimación base de 3.500kg/hr de materia prima.

Con respecto a las impurezas de la corriente de ingreso, el LDPE proviene de una separación óptica previa, por lo que no presenta mezclas de otros tipos de polímeros. Por otro lado, esta corriente se encuentra contaminada por distintas vías. En primer lugar, la contaminación por oxidación química proveniente del envejecimiento natural del plástico y posible contacto con agentes oxidantes, en segundo lugar, por restos de pinturas, adhesivos o metales en el proceso de fabricación, y por último con otras impurezas propias del método de selección previo al reciclaje. [12] Tal como se indicó previamente, se utilizó un porcentaje de impurezas (PET, cauchos siliconas, espumas de poliestireno y poliuretano, metales, papel/cartón, cartón bebidas/alimentos (brik), otras impurezas, humedad) 18% [10].

Para este diseño básico, se simuló el proceso teniendo en cuenta 6 etapas de preprocesamiento:

- 1- Trituración: Se tritura el material hasta lograr un tamaño menor a 5 cm de diámetro.
- 2- Separación por tamices: En esta etapa se elimina la mayor parte de impurezas por tamaño.
- 3- Limpieza con detergente: Se realiza una limpieza química primaria con detergente grado industrial con una solución al 5%.
- 4- Desinfección: Se realiza una desinfección con Hipoclorito de Sodio en solución al 5%.
- 5- Limpieza de tintas: En la última etapa de limpieza se retiran las tintas, colas y restos de pintura que pueda contener el plástico con una pequeña dosificación de Tolueno, aprovechando que será el solvente para posteriormente realizar la dilución.
- 6- Secado: Por último, se realiza un secado de la corriente en la cual se elimina la humedad que trae consigo la materia prima y la generada durante el proceso de limpieza.

Con respecto al equipo T1, la corriente no varía su composición. En cuanto al equipo S1, se considera que se elimina la mayor parte en masa de las impurezas. Posteriormente, entre los tres equipos de limpieza L1, L2 y L3 se logra eliminar el 65% de impurezas que trae la corriente, realizando a su vez una desinfección de seguridad para las etapas posteriores. Por último, la corriente ingresa al secador D1, en donde se elimina la humedad total, la cual inicialmente era del 5% [10] más lo proveniente de lo que ingresa en los equipos L1 y L2 y el parte de Tolueno de la limpieza con solvente. Tal como se comentó anteriormente las corrientes de residuos de los equipos de limpieza se contendrán en el tanque (R1) para su posterior tratamiento correspondiente.

En la imagen y tabla a continuación se puede observar el resumen del balance de masa por componente y por corriente que interviene en la etapa 1:

# Etapa 1

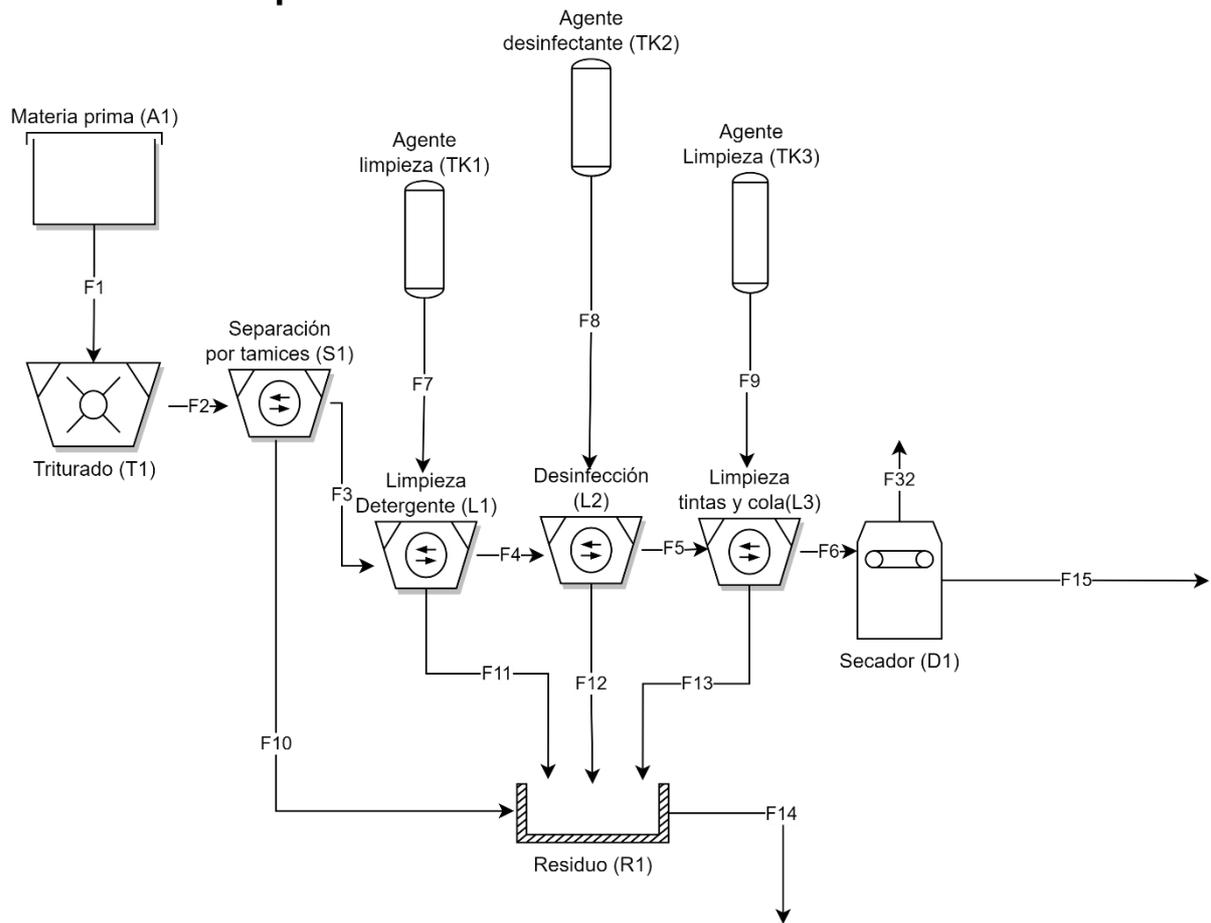


Ilustración 19 - Etapa I - Alternativa A

	Etapa I							
<i>X<sub>i,j</sub> (Composición) [kg/kg]</i>	F1	F2	F3	F10	F7	F4	F11	F8
LDPE	0,82	0,82	0,88	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00
Impurezas	0,13	0,13	0,07	1,00	0,00	0,18	0,06	0,00
Tolueno	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Hexano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Detergente industrial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,08	0,00	0,00
Hipoclorito de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
Agua	0,05	0,05	0,05	0,00	0,95	0,74	0,08	0,95
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
	Etapa I							
<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	F1	F2	F3	F10	F7	F11	F4	F8
LDPE	2.870	2.870	2.870	0	0	0	2.870	0
Impurezas	455	455	228	228	0	23	205	0
Tolueno	0	0	0	0	0	0	0	0
n-Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0
Detergente industrial	0	0	0	0	10	10	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0	0	0	0	0	10
Agua	175	175	175	0	190	95	270	190
<b>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>3.500</b>	<b>3.500</b>	<b>3.273</b>	<b>228</b>	<b>200</b>	<b>128</b>	<b>3.345</b>	<b>200</b>
	Etapa I							
<i>X<sub>i,j</sub> (Composición) [kg/kg]</i>	F12	F5	F9	F13	F6	F14	F32	F15
LDPE	0,00	0,84	0,00	0,00	0,82	0,00	0,00	0,95
Impurezas	0,18	0,05	0,00	0,19	0,05	0,49	0,00	0,05
Tolueno	0,00	0,00	1,00	0,81	0,03	0,17	0,22	0,00
n-Hexano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Detergente industrial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Hipoclorito de Sodio	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Agua	0,74	0,11	0,00	0,00	0,10	0,31	0,78	0,00
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
	Etapa I							
<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	F12	F5	F9	F13	F6	F14	F32	F15
LDPE	0	2.870	0	0	2.870	0	0	2.870
Impurezas	23	182	0	23	159	296	0	159
Tolueno	0	0	200	100	100	100	100	0
n-Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0
Detergente industrial	0	0	0	0	0	10	0	0
Hipoclorito de Sodio	10	0	0	0	0	10	0	0
Agua	95	365	0	0	365	190	365	0
<b>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>128</b>	<b>3.417</b>	<b>200</b>	<b>123</b>	<b>3.494</b>	<b>606</b>	<b>465</b>	<b>3.029</b>

Tabla 15 - Caudales y composiciones etapa I - Alternativa A

En la tabla a continuación, se puede observar el balance de masa global por componente de toda la etapa 1:

<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	Entradas				Salidas			TOTAL
	F1	F7	F8	F9	F14	F32	F15	
LDPE	2.870	0	0	0	0	0	2.870	0
Impurezas	455	0	0	0	296	0	159	0
Tolueno	0	0	0	200	100	100	0	0
n-Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0
Detergente industrial	0	10	0	0	10	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	10	0	10	0	0	0
Agua	175	190	190	0	190	365	0	0
<i>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</i>	<b>3.500</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>606</b>	<b>465</b>	<b>3.029</b>	<b>0</b>

Tabla 16 - Balance de masa global por componente - Etapa 1 - Alternativa A

### Etapa II

En nuestra segunda etapa, el equipo en donde se lleva a cabo la dilución (R1) deben ingresar las corrientes de plástico tipo film y Tolueno respetando las proporciones observadas en los ensayos a escala laboratorio del capítulo 4. Con respecto al Tolueno, en la técnica 1 la proporción utilizada es de 1:20 (Masa LDPE:Volumen Tolueno), y en la técnica 3 es de 1:15 (Masa LDPE:Volumen Tolueno), en este caso de estudio se utilizó el escenario menos favorable, es decir 1:20, por lo que la corriente de ingreso al reactor R1 fue un dato inicial para el balance de masa.

Luego, en el filtro F1, se considera que van a separarse las impurezas teniendo en cuenta lo ilustrado en las conclusiones técnicas de los estudios en laboratorio, la dilución en el caso del Tolueno fue del 100%, por lo que considerando una eficiencia de filtrado del 100%, la corriente quedaría libre de impurezas para su posterior etapa de precipitación. También se considera que en la corriente de residuo F22, quedará adherido en 15% de Tolueno en su porcentaje en peso.

Posteriormente, en el equipo de dilución se debe respetar la relación 1:3 (solvente/precipitante) en volumen tal como se utilizaron en tres de las cuatro técnicas estudiadas. Por lo que la corriente F21 es una variable dependiente de la corriente. En este mismo tanque, el porcentaje de recuperación, tal como se indica en las técnicas 1 y 2 es del 97,7%, por lo que la corriente de salida contendrá un 97,7% de lo que ingresó, el resto quedará en el sistema y se eliminará por la corriente de residuo F22 con el resto de las impurezas.

Por último, la corriente pasa por el filtro F2 en la cual se separa la corriente líquida de la sólida. En este equipo también se considera que queda retenido un 15% en masa de líquidos (un 7,5% de Tolueno y un 7,5% de n-hexano).

El balance de masa quedaría tal como se indica en el siguiente cuadro:

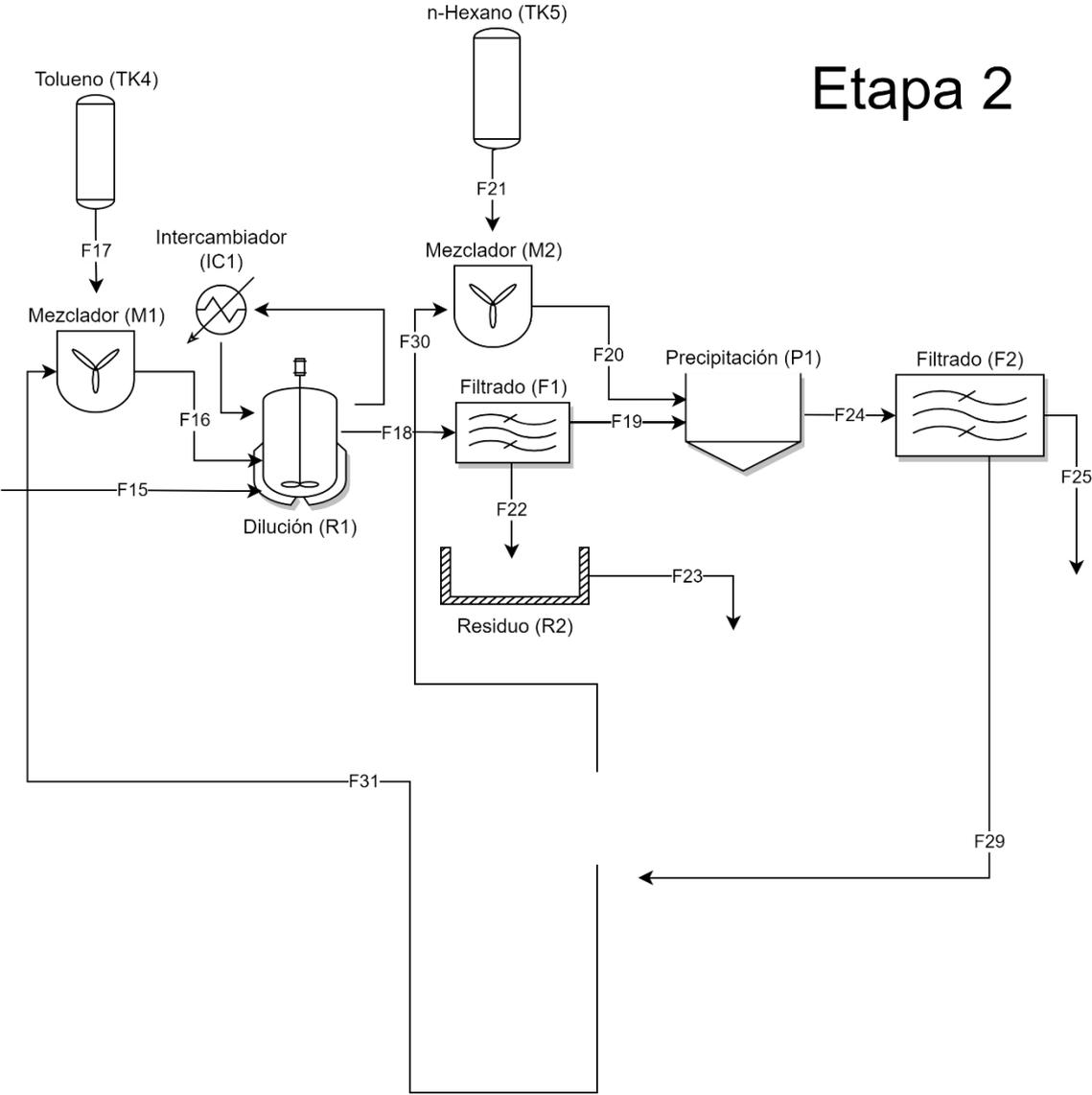


Ilustración 20 - Etapa II - Alternativa A

	Etapa II													
<i>X<sub>i,j</sub> (Composición) [kg/kg]</i>	F15	F31	F17	F16	F18	F19	F22	F23	F21	F30	F20	F24	F25	F29
LDPE	0,95	0,00	0,00	0,00	0,06	0,05	0,26	0,26	0,00	0,00	0,00	0,02	0,87	0,00
Impurezas	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tolueno	0,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,95	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,30	0,07	0,31
n-Hexano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,68	0,07	0,69
Detergente industrial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hipoclorito de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
	Etapa II													
<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	F15	F31	F17	F16	F18	F19	F22	F23	F21	F30	F20	F24	F25	F29
LDPE	2.870	66	0	66	2.936	2.870	66	66	0	0	0	2.870	2.804	66
Impurezas	159	0	0	0	159	0	159	159	0	0	0	0	0	0
Tolueno	0	49.532	234	49.766	49.766	49.742	24	24	0	0	0	49.742	210	49.532
n-Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0	210	112.527	112.737	112.737	210	112.527
Detergente industrial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>3.029</b>	<b>49.598</b>	<b>234</b>	<b>49.832</b>	<b>52.861</b>	<b>52.612</b>	<b>249</b>	<b>249</b>	<b>210</b>	<b>112.527</b>	<b>112.737</b>	<b>165.349</b>	<b>3.225</b>	<b>162.124</b>

Tabla 17 - Caudales y composiciones etapa II - Alternativa A

En la tabla a continuación, se puede observar el balance de masa global por componente de toda la etapa 2:

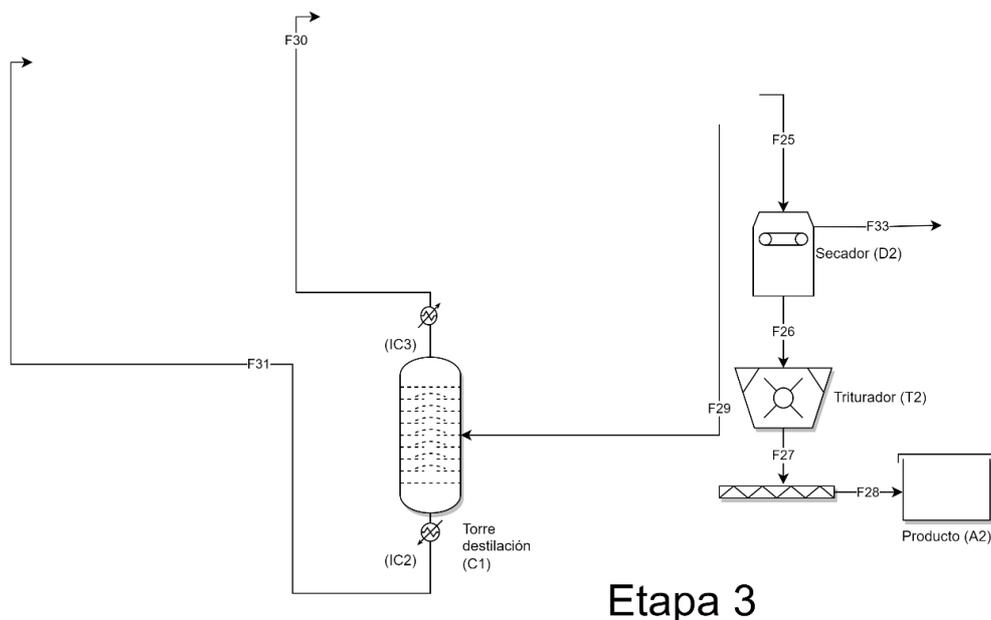
	Entradas					Salidas			TOTAL
<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	F15	F31	F17	F21	F30	F29	F25	F23	
LDPE	2.870	66	0	0	0	66	2.804	66	<b>0</b>
Impurezas	159	0	0	0	0	0	0	159	<b>0</b>
Tolueno	0	49.532	234	0	0	49.532	210	24	<b>0</b>
n-Hexano	0	0	0	210	112.527	112.527	210	0	<b>0</b>
Detergente industrial	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
Hipoclorito de Sodio	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
<b>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>3.029</b>	<b>49.598</b>	<b>234</b>	<b>210</b>	<b>112.527</b>	<b>162.124</b>	<b>3.225</b>	<b>249</b>	<b>0</b>

Tabla 18 - Balance de masa global por componente - Etapa 2 - Alternativa A

### Etapa III

Por último, en la tercera etapa, la corriente de salida sólida del filtro F2 pasa por un secador en la cual se elimina el resto de los solventes para luego ser triturada.

En cuanto a la corriente líquida ingresa a la torre de destilación C1, en la cual se considera una separación total del Tolueno por el fondo y el n-Hexano por la cabeza. Estas corrientes ingresan al mezclador 1 y 2 respectivamente. El balance de masa quedaría tal como se indica en el siguiente cuadro:



Etapa 3

Ilustración 21 - Etapa III - Alternativa A

	Etapa III							
$X_{i,j}$ (Composición) [kg/kg]	F25	F29	F26	F33	F27	F30	F31	F28
LDPE	0,87	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00
Impurezas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tolueno	0,07	0,31	0,00	0,50	0,00	0,00	1,00	0,00
n-Hexano	0,07	0,69	0,00	0,50	0,00	1,00	0,00	0,00
Detergente industrial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hipoclorito de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
	Etapa III							
$W_{i,j}$ (Flujo másico) [kg/hr]	F25	F29	F26	F33	F27	F30	F31	F28
LDPE	2.804	66	2.804	0	2.804	0	66	2.804
Impurezas	0	0	0	0	0	0	0	0
Tolueno	210	49.532	0	210	0	0	49.532	0
n-Hexano	210	112.527	0	210	0	112.527	0	0
Detergente industrial	0	0	0	0	0	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0
$F_j$ (Flujo másico total) [kg/hr]	<b>3.225</b>	<b>162.124</b>	<b>2.804</b>	<b>421</b>	<b>2.804</b>	<b>112.527</b>	<b>49.598</b>	<b>2.804</b>

Tabla 19 - Caudales y composiciones etapa III - Alternativa A

En la tabla a continuación, se puede observar el balance de masa global por componente de toda la etapa 3:

<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	Entradas			Salidas			TOTAL
	F25	F29	F33	F30	F31	F28	
LDPE	2.804	66	0	0	66	2.804	0
Impurezas	0	0	0	0	0	0	0
Tolueno	210	49.532	210	0	49.532	0	0
n-Hexano	210	112.527	210	112.527	0	0	0
Detergente industrial	0	0	0	0	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b><i>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</i></b>	<b>3.225</b>	<b>162.124</b>	<b>421</b>	<b>112.527</b>	<b>49.598</b>	<b>2.804</b>	<b>0</b>

Tabla 20 - Balance de masa global por componente - Etapa 3 - Alternativa A

A continuación, se ilustra una tabla resumen del balance de masa de materias primas, producto final y residuos en las corrientes de entrada y salida del proceso completo.

<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	Entradas						Salidas					TOTAL
	F1	F7	F8	F9	F17	F21	F14	F32	F23	F33	F28	
LDPE	2.870	0	0	0	0	0	0	0	66	0	2.804	<b>0</b>
Impurezas	455	0	0	0	0	0	296	0	159	0	0	<b>0</b>
Tolueno	0	0	0	200	234	0	100	100	24	210	0	<b>0</b>
n-Hexano	0	0	0	0	0	210	0	0	0	210	0	<b>0</b>
Detergente industrial	0	10	0	0	0	0	10	0	0	0	0	<b>0</b>
Hipoclorito de Sodio	0	0	10	0	0	0	10	0	0	0	0	<b>0</b>
Agua	175	190	190	0	0	0	190	365	0	0	0	<b>0</b>
<b><i>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</i></b>	<b>3.500</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>234</b>	<b>210</b>	<b>606</b>	<b>465</b>	<b>249</b>	<b>421</b>	<b>2.804</b>	<b>0</b>

Tabla 21 - Balance de masa global - Alternativa A

## 6.1.2 Balance de materia alternativa B – Utilización de Xileno como solvente

Para realizar el balance de materia se dividió el proceso en 3 etapas. La primera etapa involucra el acondicionamiento de la materia prima, en la segunda se centra en la dilución, precipitación y filtrado. Por último, la tercera etapa implica el acondicionamiento del producto final, así como también la torre de destilación para la recuperación de reactivos implicados en el proceso. Se puede ver en el siguiente diagrama las distintas etapas implicadas.

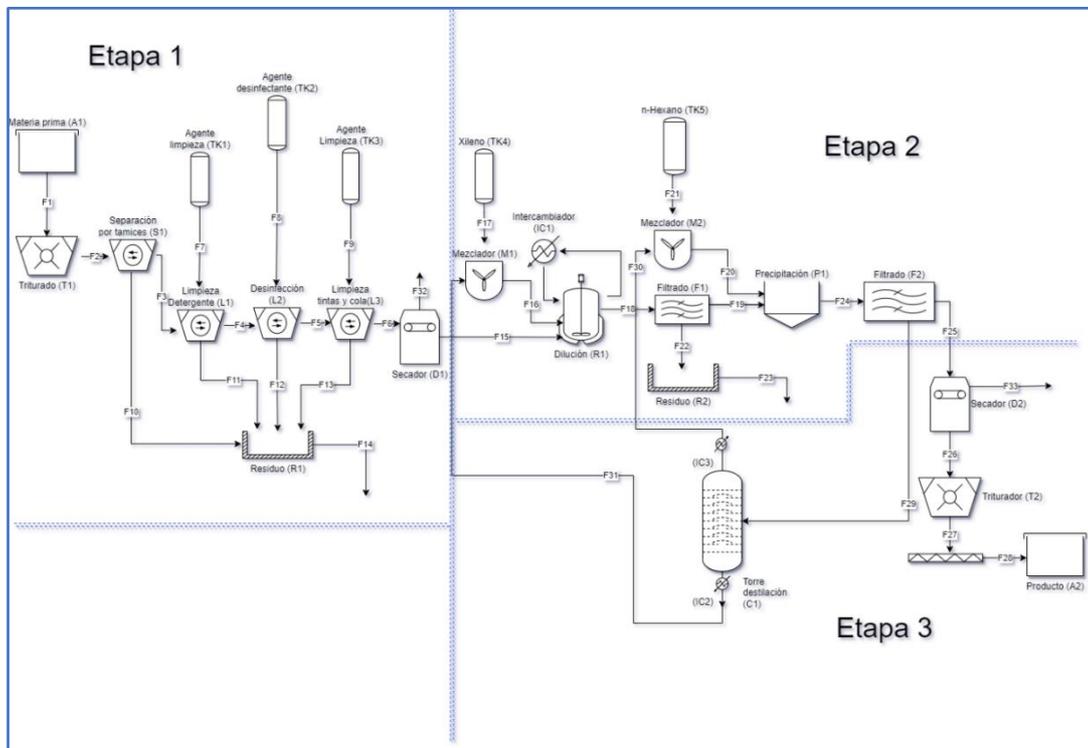


Ilustración 22 - Etapas proceso Alternativa B

A continuación, se especifican el orden de las sustancias involucradas en el proceso y las referencias de la nomenclatura correspondiente al cálculo de los flujos de las corrientes del proceso y sus respectivas composiciones. Orden de las sustancias:

N°	Sustancia del proceso
1	LDPE
2	Impurezas
3	Tolueno
4	n-Hexano
5	Detergente Industrial
6	Hipoclorito de Sodio
7	Agua

Tabla 22 - Orden y nomenclatura de las sustancias implicadas en el proceso

Nomenclatura:

$F_j$ : Caudal másico total de la corriente  $j$  [kg/hr].

$W_{i,j}$ : Caudal másico del componente  $i$  en la corriente  $j$  [kg/h].

$X_{i,j}$ : Fracción másica del componente  $i$  en la corriente  $j$  [kg/kg].

## Etapa I

En nuestra etapa inicial, el caudal de materia prima es 20.000 toneladas año, o bien teniendo en cuenta 300 días operativos al año, una operación continua de tres turnos, con un 80% de horas operativas (debido a paradas programadas, cambios de turno, etc.) hace un total de 3.472 kg/hr. Para este trabajo, se realizó con una estimación base de 3.500kg/hr de materia prima.

Con respecto a las impurezas de la corriente de ingreso, el LDPE proviene de una separación óptica previa, por lo que no presenta mezclas de otros tipos de polímeros. Por otro lado, esta corriente se encuentra contaminada por distintas vías. En primer lugar, la contaminación por oxidación química proveniente del envejecimiento natural del plástico y posible contacto con agentes oxidantes, en segundo lugar, por restos de pinturas, adhesivos o metales en el proceso de fabricación, y por último con otras impurezas propias del método de selección previo al reciclaje. [12] Tal como se indicó previamente, se utilizó un porcentaje de impurezas (PET, cauchos siliconas, espumas de poliestireno y poliuretano, metales, papel/cartón, cartón bebidas/alimentos (brik), otras impurezas, humedad) 18% [10].

Para este diseño básico, se simuló el proceso teniendo en cuenta 6 etapas de preprocesamiento:

- 1- Trituración: Se tritura el material hasta lograr un tamaño menor a 5 cm de diámetro.
- 2- Separación por tamices: En esta etapa se elimina la mayor parte de impurezas por tamaño.
- 3- Limpieza con detergente: Se realiza una limpieza química primaria con detergente grado industrial con una solución al 5%.
- 4- Desinfección: Se realiza una desinfección con Hipoclorito de Sodio en solución al 5%.
- 5- Limpieza de tintas: En la última etapa de limpieza se retiran las tintas, colas y restos de pintura que pueda contener el plástico con una pequeña dosificación de Xileno, aprovechando que será el solvente para posteriormente realizar la dilución.
- 6- Secado: Por último, se realiza un secado de la corriente en la cual se elimina la humedad que trae consigo la materia prima y la generada durante el proceso de limpieza.

Con respecto al equipo T1, la corriente no varía su composición. En cuanto al equipo S1, se considera que se elimina la mayor parte en masa de las impurezas. Posteriormente, entre los tres equipos de limpieza L1, L2 y L3 se logra eliminar el 65% de impurezas que trae la corriente, realizando a su vez una desinfección de seguridad para las etapas posteriores. Por último, la corriente ingresa al secador D1, en donde se elimina la humedad total, la cual inicialmente era del 5% [10] más lo proveniente de lo que ingresa en los equipos L1 y L2 Y el parte de Xileno de la limpieza con solvente. Tal como se comentó anteriormente las corrientes de residuos de los equipos de limpieza se contendrán en el tanque (R1) para su posterior tratamiento correspondiente.

En la imagen y tabla a continuación se puede observar el resumen del balance de masa por componente y por corriente que interviene en la etapa 1:

# Etapa 1

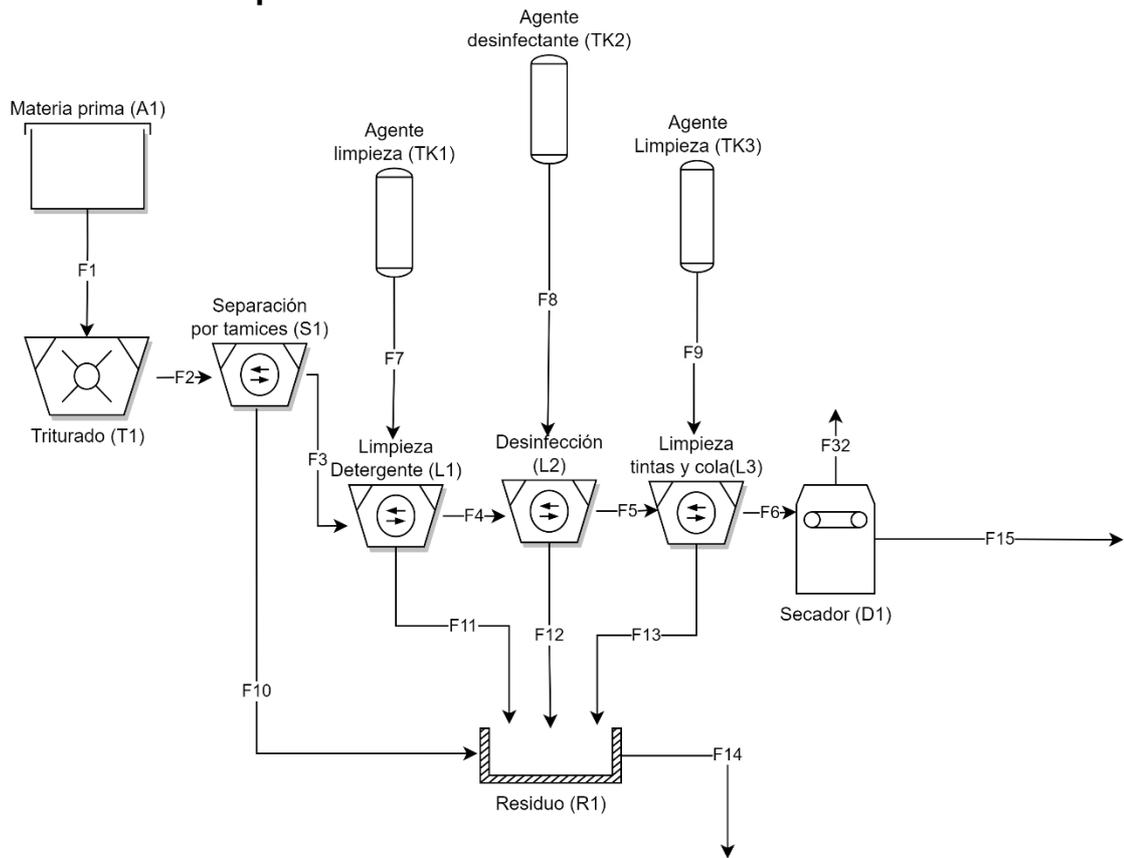


Ilustración 23 - Etapa I - Alternativa B

	Etapa I							
<i>X<sub>i,j</sub> (Composición) [kg/kg]</i>	F1	F2	F3	F10	F7	F4	F11	F8
LDPE	0,82	0,82	0,88	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00
Impurezas	0,13	0,13	0,07	1,00	0,00	0,18	0,06	0,00
Xileno	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Hexano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Detergente industrial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,08	0,00	0,00
Hipoclorito de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
Agua	0,05	0,05	0,05	0,00	0,95	0,74	0,08	0,95
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
	Etapa I							
<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	F1	F2	F3	F10	F7	F11	F4	F8
LDPE	2.870	2.870	2.870	0	0	0	2.870	0
Impurezas	455	455	228	228	0	23	205	0
Xileno	0	0	0	0	0	0	0	0
n-Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0
Detergente industrial	0	0	0	0	10	10	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0	0	0	0	0	10
Agua	175	175	175	0	190	95	270	190
<b>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>3.500</b>	<b>3.500</b>	<b>3.273</b>	<b>228</b>	<b>200</b>	<b>128</b>	<b>3.345</b>	<b>200</b>
	Etapa I							
<i>X<sub>i,j</sub> (Composición) [kg/kg]</i>	F12	F5	F9	F13	F6	F14	F32	F15
LDPE	0,00	0,84	0,00	0,00	0,82	0,00	0,00	0,95
Impurezas	0,18	0,05	0,00	0,19	0,05	0,49	0,00	0,05
Xileno	0,00	0,00	1,00	0,81	0,03	0,17	0,22	0,00
n-Hexano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Detergente industrial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Hipoclorito de Sodio	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Agua	0,74	0,11	0,00	0,00	0,10	0,31	0,78	0,00
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
	Etapa I							
<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	F12	F5	F9	F13	F6	F14	F32	F15
LDPE	0	2.870	0	0	2.870	0	0	2.870
Impurezas	23	182	0	23	159	296	0	159
Xileno	0	0	200	100	100	100	100	0
n-Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0
Detergente industrial	0	0	0	0	0	10	0	0
Hipoclorito de Sodio	10	0	0	0	0	10	0	0
Agua	95	365	0	0	365	190	365	0
<b>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>128</b>	<b>3.417</b>	<b>200</b>	<b>123</b>	<b>3.494</b>	<b>606</b>	<b>465</b>	<b>3.029</b>

Tabla 23 - Caudales y composiciones etapa I - Alternativa B

En la tabla a continuación, se puede observar el balance de masa global por componente de toda la etapa 1:

<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	Entradas				Salidas			TOTAL
	F1	F7	F8	F9	F14	F32	F15	
<b>LDPE</b>	2.870	0	0	0	0	0	2.870	<b>0</b>
<b>Impurezas</b>	455	0	0	0	296	0	159	<b>0</b>
<b>Xileno</b>	0	0	0	200	100	100	0	<b>0</b>
<b>n-Hexano</b>	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
<b>Detergente industrial</b>	0	10	0	0	10	0	0	<b>0</b>
<b>Hipoclorito de Sodio</b>	0	0	10	0	10	0	0	<b>0</b>
<b>Agua</b>	175	190	190	0	190	365	0	<b>0</b>
<b><i>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</i></b>	<b>3.500</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>606</b>	<b>465</b>	<b>3.029</b>	<b>0</b>

Tabla 24 - Balance de masa global por componente - Etapa 1 - Alternativa B

### Etapa II

En nuestra segunda etapa, el equipo en donde se lleva a cabo la dilución (R1) deben ingresar las corrientes de plástico tipo film y Xileno respetando las proporciones observadas en los ensayos a escala laboratorio del capítulo 4. Con respecto al Xileno, en la técnica 1 la proporción utilizada es de 1:20 (Masa LDPE:Volumen Xileno), y en la técnica 4 es de 1:40 (Masa LDPE:Volumen Xileno), en este caso de estudio se utilizó el escenario de la técnica 1, es decir 1:20, para utilizar en ambos casos la misma técnica de estudio en laboratorio. Por lo que la corriente de ingreso al reactor R1 fue un dato inicial para el balance de masa.

Luego, en el filtro F1, se considera que van a separarse las impurezas teniendo en cuenta lo ilustrado en las conclusiones técnicas de los estudios en laboratorio, la dilución en el caso del Xileno fue del 99,4%, por lo que se ha considerado para este diseño básico una eficiencia de filtrado del 100%, la corriente quedaría libre de impurezas para su posterior etapa de precipitación. También se considera que en la corriente de residuo F22, quedará adherido en 15% de Xileno en su porcentaje en peso.

Posteriormente, en el equipo de dilución se debe respetar la relación 1:3 (solvente/precipitante) en volumen tal como se utilizaron en tres de las cuatro técnicas estudiadas. Por lo que la corriente F21 es una variable dependiente de la corriente de alimentación. En este mismo tanque, el porcentaje de recuperación, tal como se indica en las técnicas 1 y 2 es del 98,6%, por lo que la corriente de salida contendrá un 98,6% de lo que ingresó, el resto quedará en el sistema y se eliminará por la corriente de residuo F22 con el resto de las impurezas.

Por último, la corriente pasa por el filtro F2 en la cual se separa la corriente líquida de la sólida. En este equipo también se considera que queda retenido un 15% en masa de líquidos (un 7,5% de Xileno y un 7,5% de n-hexano).

El balance de masa quedaría tal como se indica en el siguiente cuadro:

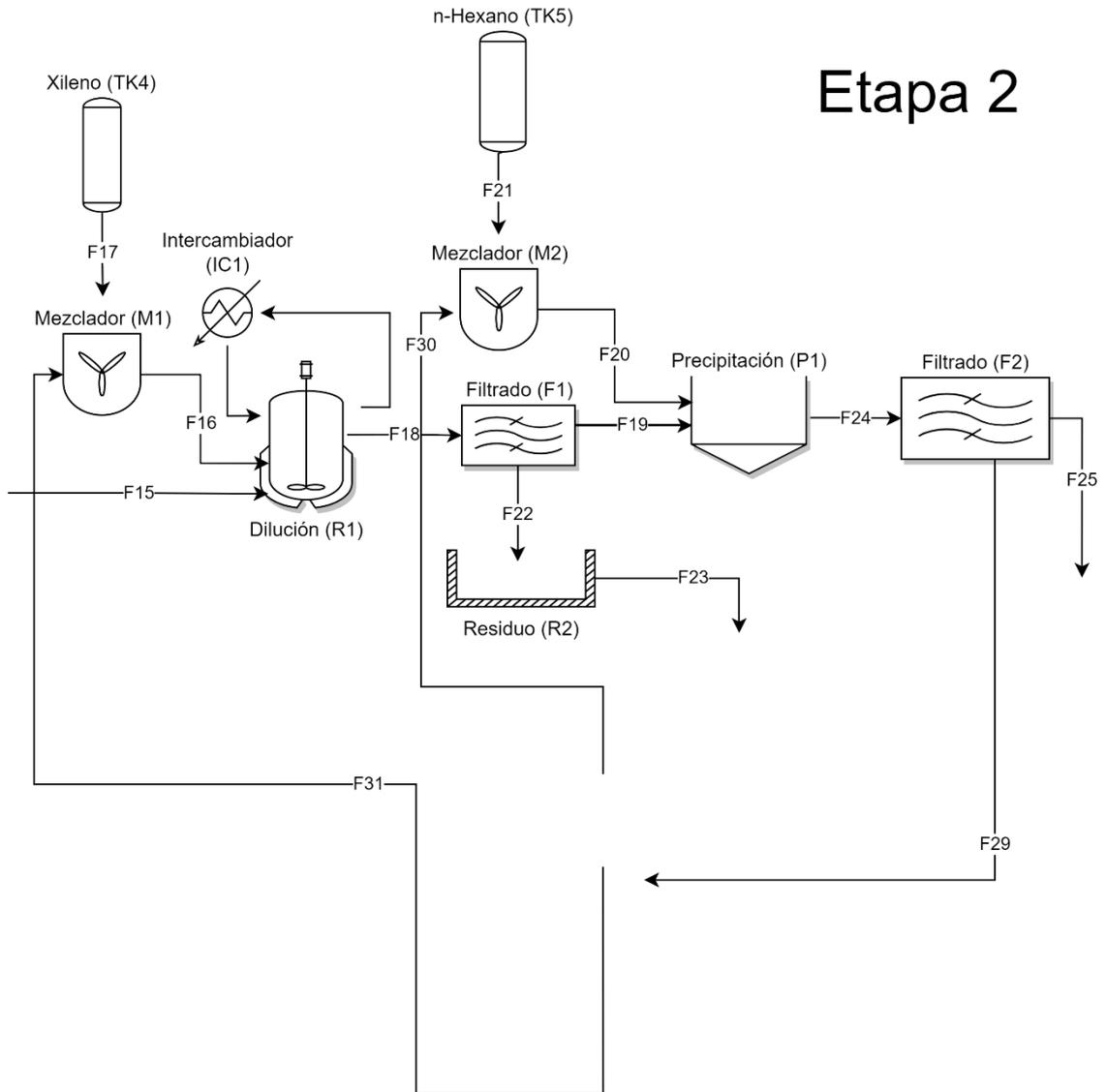


Ilustración 24 - Etapa II - Alternativa B

	Etapa II													
<i>X<sub>i,j</sub> (Composición) [kg/kg]</i>	F15	F31	F17	F16	F18	F19	F22	F23	F21	F30	F20	F24	F25	F29
LDPE	0,95	0,00	0,00	0,00	0,06	0,05	0,18	0,18	0,00	0,00	0,00	0,02	0,87	0,00
Impurezas	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,71	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Xileno	0,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,95	0,11	0,11	0,00	0,00	0,00	0,30	0,07	0,31
n-Hexano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,68	0,07	0,69
Detergente industrial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hipoclorito de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
	Etapa II													
<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	F15	F31	F17	F16	F18	F19	F22	F23	F21	F30	F20	F24	F25	F29
LDPE	2.870	40	0	40	2.910	2.870	40	40	0	0	0	2.870	2.830	40
Impurezas	159	0	0	0	159	0	159	159	0	0	0	0	0	0
Xileno	0	49.415	236	49.651	49.651	49.627	24	24	0	0	0	49.627	212	49.415
n-Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0	212	112.524	112.737	112.737	212	112.524
Detergente industrial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>3.029</b>	<b>49.455</b>	<b>236</b>	<b>49.691</b>	<b>52.720</b>	<b>52.497</b>	<b>223</b>	<b>223</b>	<b>212</b>	<b>112.524</b>	<b>112.737</b>	<b>165.234</b>	<b>3.254</b>	<b>161.980</b>

Tabla 25 - Caudales y composiciones etapa II - Alternativa B

En la tabla a continuación, se puede observar el balance de masa global por componente de toda la etapa 2:

	Entradas					Salidas			TOTAL
<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	F15	F31	F17	F21	F30	F29	F25	F23	
LDPE	2.870	40	0	0	0	40	2.830	40	<b>0</b>
Impurezas	159	0	0	0	0	0	0	159	<b>0</b>
Xileno	0	49.415	236	0	0	49.415	212	24	<b>0</b>
n-Hexano	0	0	0	212	112.524	112.524	212	0	<b>0</b>
Detergente industrial	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
Hipoclorito de Sodio	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
<b>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>3.029</b>	<b>49.455</b>	<b>236</b>	<b>212</b>	<b>112.524</b>	<b>161.980</b>	<b>3.254</b>	<b>223</b>	<b>0</b>

Tabla 26 - Balance de masa global por componente - Etapa 2 - Alternativa B

### Etapa III

Por último, en la tercera etapa, la corriente de salida sólida del filtro F2 pasa por un secador en la cual se elimina el resto de los solventes para luego ser triturada.

En cuanto a la corriente líquida ingresa a la torre de destilación C1, en la cual se considera una separación total del Xileno por el fondo y el n-Hexano por la cabeza. Estas corrientes ingresan al mezclador 1 y 2 respectivamente. El balance de masa quedaría tal como se indica en el siguiente cuadro:

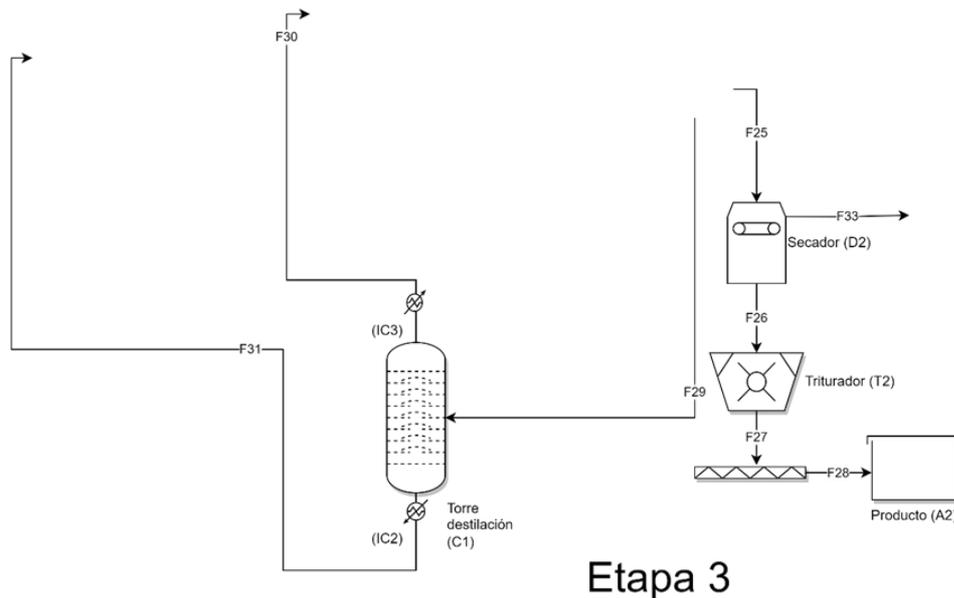


Ilustración 25 - Etapa III - Alternativa B

	Etapa III							
<i>X<sub>i,j</sub> (Composición) [kg/kg]</i>	F25	F29	F26	F33	F27	F30	F31	F28
LDPE	0,87	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00
Impurezas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Xileno	0,07	0,31	0,00	0,50	0,00	0,00	1,00	0,00
n-Hexano	0,07	0,69	0,00	0,50	0,00	1,00	0,00	0,00
Detergente industrial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hipoclorito de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>TOTAL</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
	Etapa III							
<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	F25	F29	F26	F33	F27	F30	F31	F28
LDPE	2.830	40	2.830	0	2.830	0	40	2.830
Impurezas	0	0	0	0	0	0	0	0
Xileno	212	49.415	0	212	0	0	49.415	0
n-Hexano	212	112.524	0	212	0	112.524	0	0
Detergente industrial	0	0	0	0	0	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>3.254</b>	<b>161.980</b>	<b>2.830</b>	<b>424</b>	<b>2.830</b>	<b>112.524</b>	<b>49.455</b>	<b>2.830</b>

Tabla 27 - Caudales y composiciones etapa III - Alternativa B

En la tabla a continuación, se puede observar el balance de masa global por componente de toda la etapa 3:

<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	Entradas			Salidas			TOTAL
	F25	F29	F33	F30	F31	F28	
LDPE	2.830	40	0	0	40	2.830	0
Impurezas	0	0	0	0	0	0	0
Xileno	212	49.415	212	0	49.415	0	0
n-Hexano	212	112.524	212	112.524	0	0	0
Detergente industrial	0	0	0	0	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<i>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</i>	<b>3.254</b>	<b>161.980</b>	<b>424</b>	<b>112.524</b>	<b>49.455</b>	<b>2.830</b>	<b>0</b>

Tabla 28 - Balance de masa global por componente - Etapa 3 - Alternativa B

A continuación, se ilustra una tabla resumen del balance de masa de materias primas, producto final y residuos en las corrientes de entrada y salida del proceso completo.

<i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i>	Entradas						Salidas					TOTAL
	F1	F7	F8	F9	F17	F21	F14	F32	F23	F33	F28	
LDPE	2.870	0	0	0	0	0	0	0	40	0	2.830	<b>0</b>
Impurezas	455	0	0	0	0	0	296	0	159	0	0	<b>0</b>
Xileno	0	0	0	200	236	0	100	100	24	212	0	<b>0</b>
n-Hexano	0	0	0	0	0	212	0	0	0	212	0	<b>0</b>
Detergente industrial	0	10	0	0	0	0	10	0	0	0	0	<b>0</b>
Hipoclorito de Sodio	0	0	10	0	0	0	10	0	0	0	0	<b>0</b>
Agua	175	190	190	0	0	0	190	365	0	0	0	<b>0</b>
<i>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</i>	<b>3.500</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>236</b>	<b>212</b>	<b>606</b>	<b>465</b>	<b>223</b>	<b>424</b>	<b>2.830</b>	<b>0</b>

Tabla 29 - Balance de masa global - Alternativa B

## 6.2 Balance de energía y servicios auxiliares

En esta sección se encuentran los cálculos para obtener los caudales necesarios de gas natural y energía eléctrica para satisfacer los requerimientos energéticos del proceso. Los equipos que más demanda energética poseen son los secadores y los intercambiadores de calor de la corriente que ingresa al tanque de dilución y el hervidor que precisa la torre de destilación para la separación del Solvente y el agente precipitante.

### 6.2.1 Balance de energía y servicios auxiliares alternativa A – Utilización de Tolueno como solvente

#### Secador (D1)

Los caudales de este equipo son los que se muestran en la siguiente tabla:

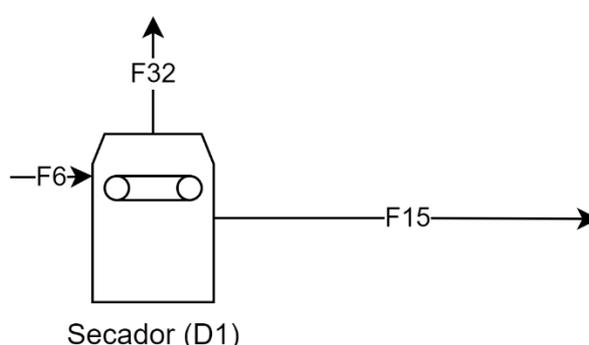


Ilustración 26 - Diagrama de flujo equipo: Secador (D1) - Alternativa A

<b><math>W_{i,j}</math> (Flujo másico) [kg/hr]</b>	<b>F6</b>	<b>F32</b>	<b>F15</b>
LDPE	2.870	0	2.870
Impurezas	159	0	159
Tolueno	100	100	0
n-Hexano	0	0	0
Detergente industrial	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0
Agua	365	365	0
<b><math>F_j</math> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>3.494</b>	<b>465</b>	<b>3.029</b>

Tabla 30 - Caudales másicos de las corrientes de ingreso y salida del Secador (D1) - Alternativa A

Es decir, el secador debe tener capacidad para evaporar 365kg/hr de agua y 100kg/hr de Tolueno. Se consideró para este primer diseño básico que ambos se eliminarán por completo. Para ello, se tuvo en cuenta que los líquidos ingresarían en condiciones ambientales (25°C) y saldrían en forma de vapor saturado.

El calor específico del agua ( $C_{ew}$ ) es:  $C_{ew} = 4,186 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$  [13] y el calor latente de vaporización ( $\delta_v$ ) es de  $\delta_v = 2264 \frac{kJ}{kg}$  [13], por otra parte, el calor específico del Tolueno  $C_{eT} = 1,13 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$  y su calor latente de vaporización es  $\delta_{eT} = 412,3 \frac{kJ}{kg}$ . Por lo que el calor teórico ( $Q_{TD1}$ ) necesario para evaporar esta corriente de líquidos esta dado por la siguiente fórmula:

$$Q_{TD1} = [C_{eT} * \Delta T * W_{3,6} + \delta_{eT} * W_{3,6}] + [C_{eW} * \Delta T * W_{7,6} + \delta_{eW} * W_{7,6}] = 1,01 * 10^6 \text{ kJ/hr}$$

$$\Delta T = \text{Variación de temperatura} = 110^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 85^\circ\text{C}$$

Se tiene en cuenta que la eficiencia de intercambio de calor del secador ( $\mu_s$ ) es del 70% [11] y el poder calorífico del GLP es igual a  $C_{GLP} = 92048 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$  [14]. Por lo que el caudal necesario de gas ( $C_{GLP}$ ) se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$Q_{GD1} = Q_{TD1} * \frac{1}{\mu_s} * \frac{1}{C_{GLP}} = 15,6 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

#### Equipo de dilución (R1) – Intercambiador IC1

Tomando en cuenta las conclusiones de las técnicas de laboratorio estudiadas en la sección 3. El tiempo de residencia del material es de 30 minutos, la temperatura que debe alcanzar la mezcla es entre 75°C y 110°C tal como se ilustró en las técnicas 1, 2 y 3. En este caso se optó por simular la corriente de entrada a 100°C para evitar llegar al punto de ebullición del Tolueno (110°C) y que permanezca a una temperatura superior a 75°C durante el tiempo de residencia del reactor. Por último, los caudales son los que se muestran en la siguiente tabla:

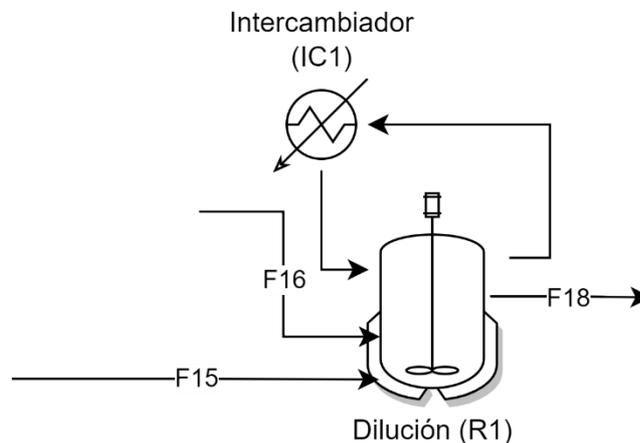


Ilustración 27 - Diagrama de flujo equipo: Dilución (R1) - Alternativa A

<b><i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i></b>	<b>F15</b>	<b>F16</b>	<b>F18</b>
LDPE	2.870	66	2.936
Impurezas	159	0	159
Tolueno	0	49.766	49.766
n-Hexano	0	0	0
Detergente industrial	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0
Agua	0	0	0
<b><i>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</i></b>	<b>3.029</b>	<b>49.832</b>	<b>52.861</b>

Tabla 31 - Caudales másicos de las corrientes de ingreso y salida de R1 - Alternativa A

Para el diseño básico se despreció el calor que absorbería la corriente de sólido, solo se considera el caudal de Tolueno que ingresa al equipo y que su tiempo de residencia es de 30 minutos, en los cuales debe mantener una temperatura en el estado estacionario de 100°C, teniendo en cuenta que ingresa a

temperatura ambiente (25°C). Para el Tolueno, el calor específico ( $C_{eT}$ ) es:  $C_{eT} = 1,13 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$ . Por esto mismo, el calor necesario para subir la temperatura de 25°C a 100°C de la corriente ( $Q_C$ ) es:

$$Q_{IC1} = C_{eT} * F_{16} * \Delta T = 4,22 * 10^6 \frac{kJ}{hr}$$

$$\Delta T = 100^\circ C - 25^\circ C = 75^\circ C$$

Para calentar esta corriente, se utilizará vapor vivo de baja presión ya que las temperaturas que debemos alcanzar son menores a 100°C. Por esto mismo, se optó por utilizar vapor a 1,5 bares y el caudal necesario ( $m_{IC1}$ ) se calculó mediante la siguiente expresión, siendo  $\delta_{v1,5} = 2392,7 \frac{kJ}{hr}$  [13]. Para el diseño básico se estimó una eficiencia del 75% ( $\mu_{IC1} = 0,75$ ).

$$m_{IC1} = \frac{Q_{IC1}}{\delta_{H_{v1,5}} * \mu_{IC1}} = 2,35 * 10^3 \frac{kg}{hr}$$

Para calcular el consumo de gas de la caldera, se utilizó el poder calorífico inferior del gas natural  $C_{GLP} = 92048 \frac{kJ}{m^3}$  [14]. Se realizó el cálculo del calor necesario para llevar el agua desde su punto de ebullición (salida del IC1) en estado estacionario hasta un vapor sobrecalentado a una presión de 1,5 bares (entrada del IC1). Por otro lado, se consideró una eficiencia térmica de la caldera del 65%  $\mu_{CAL} = 0,65$ .

El calor latente de vaporización del agua ( $\delta v$ ) más el calor sensible para llevar el vapor de agua a esas condiciones es de  $\delta_{v1,5} = 2392,7 \frac{kJ}{kg}$  [13], por lo que el caudal de gas necesario para proveer este vapor será:

$$Q_{GIC1} = \delta_{v1,5} * m_{IC1} * \frac{1}{\mu_{CAL}} * \frac{1}{C_{GLP}} = 94,1 \frac{m^3}{hr} \quad (1)$$

Se estima que la disipación de calor durante el tiempo de residencia del reactor (aislado) generará una disminución de temperatura menor a 25°, por lo que no se requiere una camisa calefactora en el tanque de dilución.

### Secador (D2)

Los caudales de este equipo son los que se muestran en la siguiente tabla:

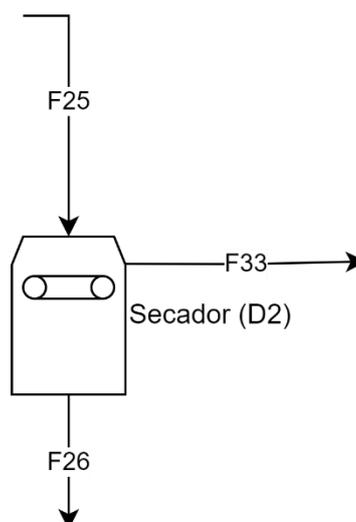


Ilustración 28 - Diagrama de flujo equipo: Secador (D2) - Alternativa A

<b><math>W_{i,j}</math> (Flujo másico) [kg/hr]</b>	<b>F25</b>	<b>F26</b>	<b>F33</b>
LDPE	2.804	2.804	0
Impurezas	0	0	0
Tolueno	210	0	210
n-Hexano	210	0	210
Detergente industrial	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0
Agua	0	0	0
<b><math>F_j</math> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>3.225</b>	<b>2.804</b>	<b>421</b>

Tabla 32 - Caudales másicos de las corrientes de ingreso y salida del Secador (D2) - Alternativa A

Es decir, el secador debe tener capacidad para evaporar  $210 \frac{kg}{hr}$  de Tolueno y  $210 \frac{kg}{hr}$  de n-Hexano. Se consideró para este primer diseño básico, que ambos líquidos se eliminaran por completo. La variación de temperatura se consideró desde los  $25^\circ C$  hasta los  $110^\circ$  ya que esta es la temperatura de ebullición del Tolueno.

El calor específico del Tolueno  $C_{eT} = 1,13 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$  y su calor latente de vaporización es  $\delta_{eT} = 412,3 \frac{kJ}{kg}$ . El calor específico del n-Hexano es  $C_{eH} = 2,20 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$  y su calor latente de vaporización es  $\delta_{eH} = 366,1 \frac{kJ}{kg}$ . Por lo que el calor teórico  $Q_{TD2}$  necesario para secar esta corriente está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{TD2} = [C_{eT} * \Delta T * W_{3,25} + \delta_{eT} * W_{3,25}] + [C_{eH} * \Delta T * W_{4,25} + \delta_{eH} * W_{4,25}] = 2,23 * 10^5 \frac{kJ}{kg}$$

Siendo  $\Delta T = 110^\circ C - 25^\circ C = 85^\circ C$

En este caso se optó por un secador rotatorio, se tiene en cuenta que la eficiencia de intercambio de calor del secador ( $\mu_S$ ) es del 70% y el poder calorífico del GLP es igual a  $C_{GLP} = 92048 \frac{kJ}{m^3}$  [14]. Por lo que el caudal necesario de gas ( $C_{GLP}$ ) se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$Q_{GD2} = Q_{TD2} * \frac{1}{\mu_S} * \frac{1}{C_{GLP}} = 3,46 \frac{m^3}{hr}$$

Columna (C1)

Los caudales y corrientes de este equipo son los que se muestran en la siguiente tabla:

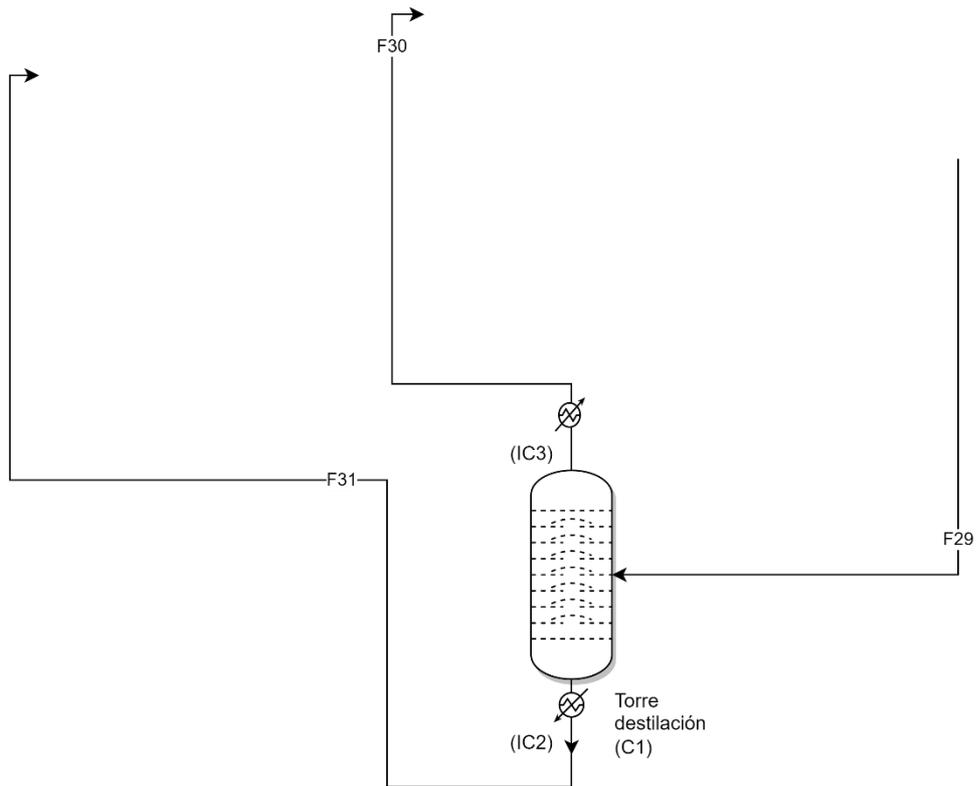


Ilustración 29 - Diagrama de flujo equipo: Torre (C1) - Alternativa A

<b><math>W_{i,j}</math> (Flujo másico) [kg/hr]</b>	<b>F29</b>	<b>F30</b>	<b>F31</b>
LDPE	66	0	66
Impurezas	0	0	0
Tolueno	49.532	0	49.532
n-Hexano	112.527	112.527	0
Detergente industrial	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0
Agua	0	0	0
<b><math>F_j</math> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>162.124</b>	<b>112.527</b>	<b>49.598</b>

Tabla 33 - Caudales másicos de las corrientes de ingreso y salida de Torre (C1) - Alternativa A

Como se explicó anteriormente, para el diseño básico se simuló la columna de destilación en el Software libre ChemSep para obtener un balance de energía estimado en el condensador y el hervidor. También se realizó la suposición de que la separación sería completa de ambos materiales de la corriente de ingreso. Los resultados pueden observarse en la tabla a continuación:

### Mass and Energy Balances

Stream / Apparatus	Energy (J/s)
F1	-167312
Top	37554.6
Bottom	76702.5
Qcondenser	-150449
Qreboiler	203503

Tabla 34 - Balance de energía simulación C1 ChepSep - Alternativa A

Los resultados obtenidos fueron:

Calor necesario a retirar en el condensador:  $Q_{IC3} = -1,5 * 10^5 \frac{J}{s} = -5,4 * 10^5 \frac{kJ}{hr}$ .

Calor necesario que incorporar en el hervidor:  $Q_{IC2} = 2,04 * 10^5 \frac{J}{s} = 7,34 * 10^5 \frac{kJ}{hr}$ .

Para el condensador, como fluido refrigerante se utilizará una corriente de agua a 25°C, ya que el punto de condensación de la corriente de salida por cabeza es de 70°C [13]. En el caso del hervidor, se utilizará el vapor de la misma calidad que en el caso del IC1 ya que las temperaturas son todas inferiores a 100°C, tal como se observa en la imagen a continuación:

Stage	Temperatur (K)
1	343.800
2	348.010
3	353.030

Tabla 35 - Balance temperaturas simulación C1 ChepSep - Alternativa A

Al igual que en el IC1, como fluido calefactor se utilizó vapor vivo a 1,5 bares ya que la temperatura no supera los 100°C. El caudal de vapor necesario ( $m_{IC2}$ ) se calculó mediante la siguiente ecuación, utilizando  $\delta_{v1,5} = 2392,7 \frac{kJ}{kg}$  [13], a su vez se consideró para el diseño básico una eficiencia del 75%  $\mu_{IC2} = 0,75$ .

$$m_{IC2} = \frac{Q_{IC2}}{\delta_{v1,5} * \mu_{IC2}} = 409 \frac{kg}{hr}$$

Para calcular el caudal de gas necesario para el IC2 se utilizó la misma expresión (1) utilizada para el IC1 que se muestra a continuación, ya que se requiere el vapor de la misma calidad:

$$Q_{GIC2} = \delta_{v1,5} * m_{IC2} * \frac{1}{\mu_{CAL}} * \frac{1}{C_{GLP}} = 16,4 \frac{m^3}{hr}$$

Tabla resumen de energía y servicios auxiliares – Alternativa A

Equipo	Calor [kJ/hr]	Vapor [kg/hr]	Gas [m <sup>3</sup> /hr]
Secador (D1)	1,01*10 <sup>6</sup>	-	15,6
Dilución (IC1)	4,22*10 <sup>6</sup>	2350	94,1
Secador (D2)	2,23*10 <sup>5</sup>	-	3,46
Hervidor (IC2)	7,34*10 <sup>5</sup>	409	16,4
Condensador (IC3)	-5,4*10 <sup>5</sup>	-	-
<b>TOTAL</b>			<b>130</b>

Tabla 36 - Resumen de energía y servicios auxiliares - Alternativa A

## 6.2.2 Balance de energía y servicios auxiliares alternativa B – Utilización de Xileno como solvente

### Secador (D1)

Los caudales de este equipo son los que se muestran en la siguiente tabla:

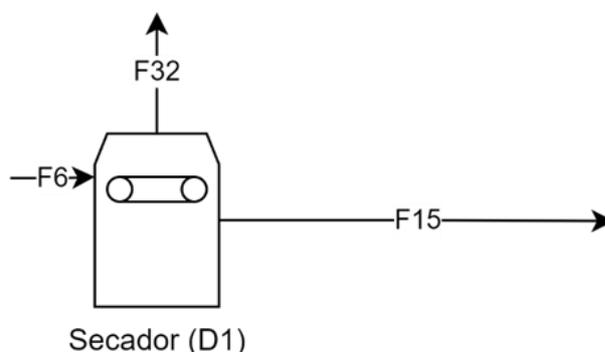


Ilustración 30 - Diagrama de flujo equipo: Secador (D1) - Alternativa B

<b><math>W_{i,j}</math> (Flujo másico) [kg/hr]</b>	<b>F6</b>	<b>F32</b>	<b>F15</b>
LDPE	2.870	0	2.870
Impurezas	159	0	159
Xileno	100	100	0
n-Hexano	0	0	0
Detergente industrial	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0
Agua	365	365	0
<b><math>F_j</math> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>3.494</b>	<b>465</b>	<b>3.029</b>

Tabla 37 - Caudales másicos de las corrientes de ingreso y salida del Secador (D1) - Alternativa B

Es decir, el secador debe tener capacidad para evaporar 365kg/hr de agua y 100kg/hr de Xileno. Se consideró para este primer diseño básico que ambos se eliminarán por completo. Para ello, se tuvo en cuenta que los líquidos ingresarían en condiciones ambientales (25°C) y saldrían en forma de vapor saturado.

El calor específico del agua ( $C_{ew}$ ) es:  $C_{ew} = 4,186 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$  [13] y el calor latente de vaporización ( $\delta_v$ ) es de  $\delta_v = 2264 \frac{kJ}{kg}$  [13], por otra parte, el calor específico del Xileno  $C_{eX} = 1,73 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$  y su calor latente de vaporización es  $\delta_{eX} = 347,1 \frac{kJ}{kg}$ . Por lo que el calor teórico ( $Q_{TD1}$ ) necesario para evaporar esta corriente de líquidos esta dado por la siguiente fórmula:

$$Q_{TD1} = [C_{eX} * \Delta T * W_{3,6} + \delta_{eX} * W_{3,6}] + [C_{ew} * \Delta T * W_{7,6} + \delta_{ew} * W_{7,6}] = 1,02 * 10^6 kJ/hr$$

$$\Delta T = \text{Variación de temperatura} = 110^\circ C - 25^\circ C = 85^\circ C$$

Se tiene en cuenta que la eficiencia de intercambio de calor del secador ( $\mu_s$ ) es del 70% [11] y el poder calorífico del GLP es igual a  $C_{GLP} = 92048 \frac{kJ}{m^3}$  [14]. Por lo que el caudal necesario de gas ( $C_{GLP}$ ) se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$Q_{GD1} = Q_{TD1} * \frac{1}{\mu_S} * \frac{1}{C_{GLP}} = 15,7 \frac{m^3}{hr}$$

Equipo de dilución (R1) – Intercambiador IC1

Tomando en cuenta las conclusiones de las técnicas de laboratorio estudiadas en la sección 3. El tiempo de residencia del material es de 30 minutos, la temperatura que debe alcanzar la mezcla es entre 75°C y 140°C tal como se ilustró en las técnicas 1, 2 y 4. En este caso se optó por simular la corriente de entrada a 130°C para evitar llegar al punto de ebullición del Xileno (140°C) y que permanezca a una temperatura superior a 75°C durante el tiempo de residencia del reactor. Por último, los caudales son los que se muestran en la siguiente tabla:

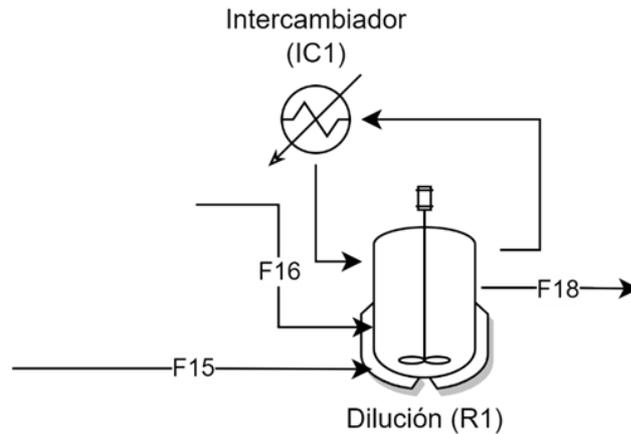


Ilustración 31 - Diagrama de flujo equipo: Dilución (R1) - Alternativa B

<b><i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i></b>	<b>F15</b>	<b>F16</b>	<b>F18</b>
LDPE	2.870	40	2.910
Impurezas	159	0	159
Xileno	0	49.651	49.651
n-Hexano	0	0	0
Detergente industrial	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0
Agua	0	0	0
<b><i>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</i></b>	<b>3.029</b>	<b>49.691</b>	<b>52.720</b>

Tabla 38 - Caudales másicos de las corrientes de ingreso y salida de R1 - Alternativa B

Para el diseño básico se despreció el calor que absorbería la corriente de sólido, solo se considera el caudal de Xileno que ingresa al equipo y que su tiempo de residencia es de 30 minutos, en los cuales debe mantener una temperatura en el estado estacionario de 130°C, teniendo en cuenta que ingresa a temperatura ambiente (25°C). Para el Xileno, el calor específico ( $C_{eT}$ ) es:  $C_{eT} = 1,73 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$ . Por esto mismo, el calor necesario para subir la temperatura de 25°C a 100°C de la corriente ( $Q_C$ ) es:

$$Q_{IC1} = C_{eT} * F_{15} * \Delta T = 9,03 * 10^6 \frac{kJ}{hr}$$

$$\Delta T = 130^\circ C - 25^\circ C = 105^\circ C$$

Para calentar esta corriente, se utilizará vapor vivo de baja presión ya que las temperaturas que debemos alcanzar son menores a 100°C. Por esto mismo, se optó por utilizar vapor a 1,5 bares y el caudal necesario

( $m_{IC1}$ ) se calculó mediante la siguiente expresión, siendo  $\delta_{v1,5} = 2392,7 \frac{kJ}{hr}$  [11]. Para el diseño básico se estimó una eficiencia del 75% ( $\mu_{IC1} = 0,75$ ).

$$m_{IC1} = \frac{Q_{IC1}}{\delta H_{v1,5} * \mu_{IC1}} = 5,03 * 10^3 \frac{kg}{hr}$$

Para calcular el consumo de gas de la caldera, se utilizó el poder calorífico inferior del gas natural  $C_{GLP} = 92048 \frac{kJ}{m^3}$  [14]. Se realizó el cálculo del calor necesario para llevar el agua desde su punto de ebullición (salida del IC1) en estado estacionario hasta un vapor sobrecalentado a una presión de 1,5 bares (entrada del IC1). Por otro lado, se consideró una eficiencia térmica de la caldera del 65%  $\mu_{CAL} = 0,65$ .

El calor latente de vaporización del agua ( $\delta v$ ) más el calor sensible para llevar el vapor de agua a esas condiciones es de  $\delta_{v1,5} = 2392,7 \frac{kJ}{kg}$  [13], por lo que el caudal de gas necesario para proveer este vapor será:

$$Q_{IC1} = \delta_{v1,5} * m_{IC1} * \frac{1}{\mu_{CAL}} * \frac{1}{C_{GLP}} = 201 \frac{m^3}{hr} \quad (1)$$

Se estima que la disipación de calor durante el tiempo de residencia del reactor (aislado) generará una disminución de temperatura menor a 25°, por lo que no se requiere una camisa calefactora en el tanque de dilución.

#### Secador (D2)

Los caudales de este equipo son los que se muestran en la siguiente tabla:

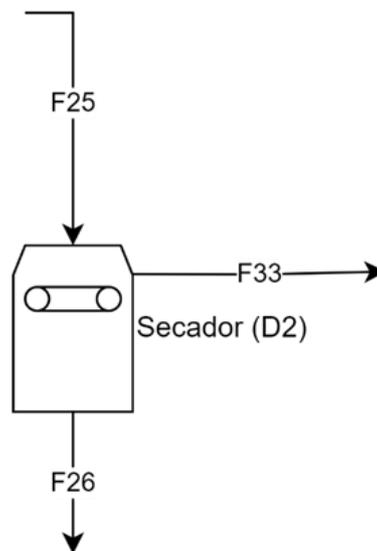


Ilustración 32 - Diagrama de flujo equipo: Secador (D2) - Alternativa B

<b><i>W<sub>i,j</sub> (Flujo másico) [kg/hr]</i></b>	<b>F25</b>	<b>F26</b>	<b>F33</b>
LDPE	2.830	2.830	0
Impurezas	0	0	0
Xileno	212	0	212
n-Hexano	212	0	212
Detergente industrial	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0
Agua	0	0	0
<b><i>F<sub>j</sub> (Flujo másico total) [kg/hr]</i></b>	<b>3.254</b>	<b>2.830</b>	<b>424</b>

Tabla 39 - Caudales másicos de las corrientes de ingreso y salida del Secador (D2) - Alternativa A

Es decir, el secador debe tener capacidad para evaporar  $212 \frac{kg}{hr}$  de Xileno y  $212 \frac{kg}{hr}$  de n-Hexano. Se consideró para este primer diseño básico, que ambos líquidos se eliminaran por completo. La variación de temperatura se consideró desde los  $25^{\circ}C$  hasta los  $140^{\circ}$  ya que esta es la temperatura de ebullición del Xileno.

El calor específico del Xileno  $C_{eX} = 1,73 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$  y su calor latente de vaporización es  $\delta_{eX} = 347,1 \frac{kJ}{kg}$ . El calor específico del n-Hexano es  $C_{eH} = 2,20 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$  y su calor latente de vaporización es  $\delta_{eH} = 366,1 \frac{kJ}{kg}$ . Por lo que el calor teórico  $Q_{TD2}$  necesario para secar esta corriente está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{TD2} = [C_{eX} * \Delta T * W_{3,25} + \delta_{eX} * W_{3,25}] + [C_{eH} * \Delta T * W_{4,25} + \delta_{eH} * W_{4,25}] = 2,39 * 10^5 \frac{kJ}{kg}$$

Siendo  $\Delta T = 140^{\circ}C - 25^{\circ}C = 115^{\circ}C$

En este caso se optó por un secador rotatorio, se tiene en cuenta que la eficiencia de intercambio de calor del secador ( $\mu_s$ ) es del 70% y el poder calorífico del GLP es igual a  $C_{GLP} = 92048 \frac{kJ}{m^3}$  [14]. Por lo que el caudal necesario de gas ( $C_{GLP}$ ) se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$Q_{GD2} = Q_{TD2} * \frac{1}{\mu_s} * \frac{1}{C_{GLP}} = 3,7 \frac{m^3}{hr}$$

Columna (C1)

Los caudales y corrientes de este equipo son los que se muestran en la siguiente tabla:

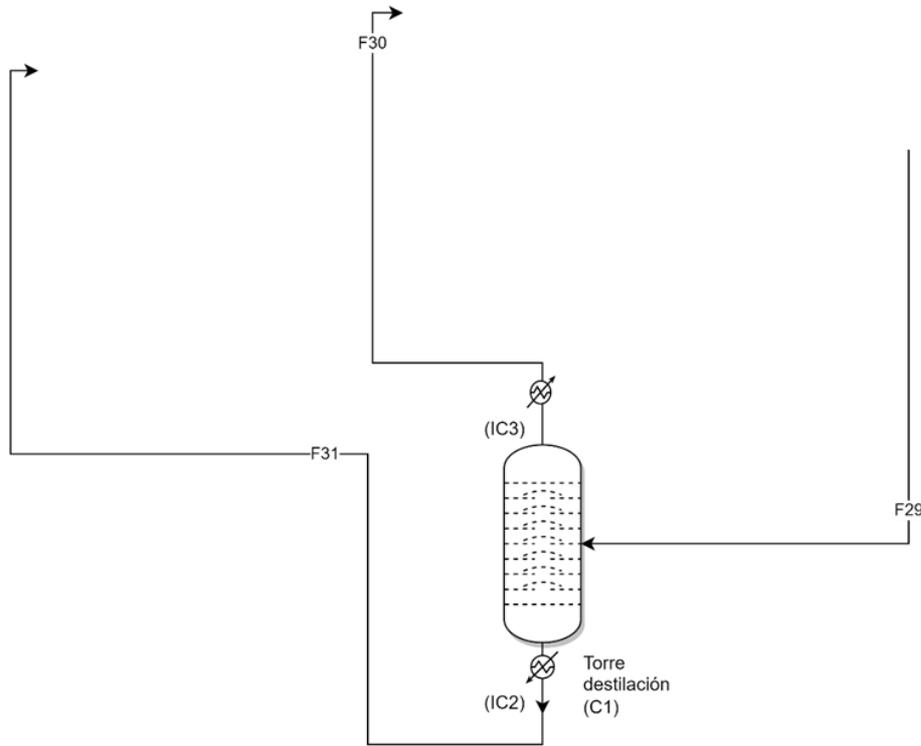


Ilustración 33 - Diagrama de flujo equipo: Torre (C1) - Alternativa B

<b><math>W_{i,j}</math> (Flujo másico) [kg/hr]</b>	<b>F29</b>	<b>F30</b>	<b>F31</b>
LDPE	40	0	40
Impurezas	0	0	0
Xileno	49.415	0	49.415
n-Hexano	112.524	112.524	0
Detergente industrial	0	0	0
Hipoclorito de Sodio	0	0	0
Agua	0	0	0
<b><math>F_j</math> (Flujo másico total) [kg/hr]</b>	<b>161.980</b>	<b>112.524</b>	<b>49.455</b>

Tabla 40 - Caudales másicos de las corrientes de ingreso y salida de Torre (C1) - Alternativa B

Como se explicó anteriormente, para el diseño básico se simuló la columna de destilación en el Software libre ChemSep para obtener un balance de energía estimado en el condensador y el hervidor. También se realizó la suposición de que la separación sería completa de ambos materiales de la corriente de ingreso. Los resultados pueden observarse en la tabla a continuación:

### Mass and Energy Balances

Stream / Apparatus	Energy (J/s)
F1	-168868
Top	36909.3
Bottom	76484.9
Qcondenser	-148272
Qreboiler	203746

Tabla 41 - Balance de energía simulación C1 ChepSep - Alternativa B

Los resultados obtenidos fueron:

Calor necesario a retirar en el condensador:  $Q_{IC3} = -1,48 * 10^5 \frac{J}{s} = -5,33 * 10^5 \frac{kJ}{hr}$ .

Calor necesario que incorporar en el hervidor:  $Q_{IC2} = 2,03 * 10^5 \frac{J}{s} = 7,31 * 10^5 \frac{kJ}{hr}$ .

Para el condensador, como fluido refrigerante se utilizará una corriente de agua a 25°C, ya que el punto de condensación de la corriente de salida por cabeza es de 69°C [13]. En el caso del hervidor, se utilizará el vapor de la misma calidad que en el caso del IC1 ya que las temperaturas son todas inferiores a 100°C, tal como se observa en la imagen a continuación:

Stage	Temperatur (K)
1	342.670
2	347.520
3	356.030

Tabla 42 - Balance temperaturas simulación C1 ChepSep - Alternativa B

Al igual que en el IC1, como fluido calefactor se utilizó vapor vivo a 1,5 bares ya que la temperatura no supera los 100°C. El caudal de vapor necesario ( $m_{IC2}$ ) se calculó mediante la siguiente ecuación, utilizando  $\delta_{v1,5} = 2392,7 \frac{kJ}{kg}$  [13], a su vez se consideró para el diseño básico una eficiencia del 75%  $\mu_{IC2} = 0,75$ .

$$m_{IC2} = \frac{Q_{IC2}}{\delta_{v1,5} * \mu_{IC2}} = 407 \frac{kg}{hr}$$

Para calcular el caudal de gas necesario para el IC2 se utilizó la misma expresión (1) utilizada para el IC1 que se muestra a continuación, ya que se requiere el vapor de la misma calidad:

$$Q_{GIC2} = \delta_{v1,5} * m_{IC2} * \frac{1}{\mu_{CAL}} * \frac{1}{C_{GLP}} = 16,3 \frac{m^3}{hr}$$

#### Tabla resumen de energía y servicios auxiliares – Alternativa B

Equipo	Calor [kJ/hr]	Vapor [kg/hr]	Gas [m <sup>3</sup> /hr]
Secador (D1)	1,02*10 <sup>6</sup>	-	15,7
Dilución (IC1)	9,03*10 <sup>6</sup>	5030	201
Secador (D2)	2,39*10 <sup>5</sup>	-	3,71
Hervidor (IC2)	7,31*10 <sup>5</sup>	407	16,3
Condensador (IC3)	-5,33*10 <sup>5</sup>	-	-
<b>TOTAL</b>			<b>237</b>

Tabla 43 - Resumen de energía y servicios auxiliares - Alternativa B

### 6.3 Comparación técnica

Tal como puede observarse, técnica y operativamente ambas alternativas son similares teniendo en cuenta variables como:

	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>
<b>Caudal Solvente</b>	Tolueno [kg/hr]	Xileno [kg/hr]
	434	436
<b>Caudal n-Hexano [kg/hr]</b>	210	212
<b>Temperatura Dilución [°C]</b>	100	130
<b>Presión de trabajo [atm]</b>	1	1
<b>Conversión</b>	0,977	0,986
<b>Caudal producto final [kg/hr]</b>	2.804	2.830
<b>Consumo de gas [m<sup>3</sup>/hr]</b>	130	237

Tabla 44 - Resumen de comparación técnica de alternativas

Si bien, la alternativa "B" posee un mayor rendimiento y una conversión ligeramente mayor en producto final, también posee mayores temperaturas de operación, por lo que obliga a tener mayores gastos energéticos. También será importante conocer los costos asociados a las materias primas en ambas alternativas.

Por esto mismo, es necesario definir la alternativa más viable ampliando el estudio e incorporando un análisis económico de las alternativas. A su vez, se consideró importante realizar un análisis del financiamiento del proyecto en caso de ser ejecutado para finalmente decidir que alternativa posee mejor desempeño teórico.

# 7 ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

---

En el siguiente capítulo se determinaron los costos de la producción y de la inversión para fijar la utilidad o ganancia, es decir, la diferencia entre el ingreso proveniente de la venta del producto y la totalidad de los gastos originados por la producción.

Para comenzar, se determinará el presupuesto de inversión, es decir, el presupuesto que se destinará a la adquisición de determinados factores o medios productivos, los cuales permiten implementar una unidad de producción que genere flujo de beneficios. Luego se determinará el presupuesto de operación, requerido para el funcionamiento de la planta. Se tomará como referencia el costo anual de operación, que tiene la ventaja de atenuar los efectos debidos a variaciones estacionales y considerar el tiempo de parada de planta y la eficiencia de los equipos. Finalmente, se realizará el estudio de factibilidad del proceso, a través de las técnicas de TIR y VAN.

## 7.1 Presupuesto de Inversión – Alternativa A

Se realizará una estimación preliminar que tiene como fin brindar los requisitos básicos y obtener una aproximación del capital necesario para el desarrollo de la planta.

### 7.1.1 Capital Fijo – Alternativa A

El capital fijo puede dividirse en dos partes para simplificar su comprensión, en primer lugar, el capital fijo directo y el capital fijo indirecto.

El capital fijo directo es el requerido para la adquisición de los equipos destinados al proceso, con todos los servicios auxiliares para su funcionamiento, teniendo en cuenta la instalación, cañerías, aislamiento e instrumentación y control.

Además, se denomina capital fijo indirecto a aquel necesario para todos los componentes de la planta que no están relacionados directamente con la operación de proceso, en este caso se tomaron en cuenta los costos de ingeniería y construcción, edificios, contingencia y a la vez las materias primas e insumos para realizar el arranque de planta, teniendo en cuenta una prueba hasta optimizar la producción.

#### **Costos directos**

##### Costos directos - Equipos

La estimación de los costos de compra de los equipos del proceso y tanques de almacenamiento fueron obtenidos a partir del promedio entre dos bases de datos, la primera “McGraw Hill Higher Education Online” [15] y la segunda “Matche” [16]. Algunos equipos fueron obtenidos directamente de fuentes de otros trabajos similares, y en el caso de la columna de destilación el software ChemSep ya se pueden obtener valores estimados del costo.

Equipo	Matche	McGraw Hill (€)	Promedio	Características del equipo
Triturador (T1)	302.300,00 €	67.185,00 €	184.742,50 €	Trituradora de rodillo, capacidad de 3500kg/hr
Triturador (T2)	302.300,00 €	67.185,00 €	184.742,50 €	Trituradora de rodillo, capacidad de 3500kg/hr
Separador por tamices (S1)	23.100,00 €	15.168,00 €	19.134,00 €	Tamiz vibratorio de 1,5m <sup>2</sup>
Limpieza (L1)	6.800,00 €	10.982,00 €	8.891,00 €	Tornillo transportador de 40 cm de diámetro y 5 metros de largo
Limpieza (L2)	6.800,00 €	10.982,00 €	8.891,00 €	Tornillo transportador de 40 cm de diámetro y 5 metros de largo
Limpieza (L3)	6.800,00 €	10.982,00 €	8.891,00 €	Tornillo transportador de 40 cm de diámetro y 5 metros de largo
Tanque (TK1)	15.700,00 €	26.933,00 €	21.316,50 €	Tanque acero al carbono para 72 horas de funcionamiento (14,4m <sup>3</sup> )
Tanque (TK2)	15.700,00 €	26.933,00 €	21.316,50 €	Tanque acero al carbono para 72 horas de funcionamiento (14,4m <sup>3</sup> )
Tanque (TK3)	15.700,00 €	26.933,00 €	21.316,50 €	Tanque acero al carbono para 72 horas de funcionamiento (14,4m <sup>3</sup> )
Tanque (TK4)	4.900,00 €	14.177,00 €	9.538,50 €	Tanque acero al carbono para 72 horas de funcionamiento (20m <sup>3</sup> )
Tanque (TK5)	4.000,00 €	12.373,00 €	8.186,50 €	Tanque acero al carbono para 72 horas de funcionamiento (15m <sup>3</sup> )
Secador (D1)	-	-	13.600,00 €	Se tomó el precio de un proceso similar de secado de plástico [17]
Secador (D2)	-	-	13.600,00 €	Se tomó el precio de un proceso similar de secado de plástico [17]
Mezclador (M1)	161.600,00 €	102.246,00 €	131.923,00 €	Tanque mezclador con un 25% de sobredimensionamiento (30m <sup>3</sup> )
Mezclador (M2)	209.100,00 €	105.707,00 €	157.403,50 €	Tanque mezclador con un 25% de sobredimensionamiento (60m <sup>3</sup> )
Dilución (R1)	161.600,00 €	102.246,00 €	131.923,00 €	Tanque mezclador con un 25% de sobredimensionamiento (60m <sup>3</sup> )
Precipitador P1	-	-	9.475,00 €	Se tomó el precio de un proceso similar de reciclado de plástico, tanque decantador. [17]
Filtro (F1)	195.300,00 €	140.617,00 €	167.958,50 €	El área se tomó de tabla de especificaciones de fabricante de filtro de tambor rotatorio. (A=12m <sup>2</sup> ) [18]
Filtro (F2)	236.100,00 €	173.868,00 €	204.984,00 €	El área se tomó de tabla de especificaciones de fabricante de filtro de tambor rotatorio. (A=20m <sup>2</sup> ) [18]
Columna (C1)	-	-	113.943,00 €	El costo de la torre se tomó directamente del software de diseño "ChemSep" en donde incluye tanto la carcasa como el relleno y cañerías.
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>1.441.776,50 €</b>	

Tabla 45 - Resumen costos directos - Alternativa A

### Costos directos – Instalación, cañerías, aislamiento e instrumentación y control

Para estimar estos costos, se utilizó el método de los “Factores de Chilton” [19]. El método de Chilton parte del valor del equipo instalado y pondera el valor del resto de costes de la instalación por unos factores medios.

<b>Instalación, cañerías, aislamiento e instrumentación y control</b>		
<b>Concepto</b>	<b>Factor de Chilton</b>	<b>Coste</b>
<b>Coste de instalación</b>	0,6	865.065,90 €
<b>Tubería de proceso [Tipo de planta: Sólido/líquidos]</b>	0,08	115.342,12 €
<b>Instrumentación [Automatización: simple]</b>	0,05	72.088,83 €
<b>Equipos auxiliares</b>	0,15	216.266,48 €
<b>TOTAL</b>		<b>1.268.763,32 €</b>

Tabla 46 - Estimación de costos de instrumentación, cañerías, aislamiento e instrumentación y control – Alternativa A

### Costos indirectos

#### Costos indirectos - Ingeniería y construcción, edificios, contingencia

Para este caso, también se utilizaron factores de Chilton [19]:

<b>Ingeniería y construcción, edificios y contingencias</b>		
<b>Concepto</b>	<b>Factor de Chilton</b>	<b>Coste</b>
<b>Edificios y preparación del terreno [Tipo de planta: mixta]</b>	0,4	576.710,60 €
<b>Ingeniería y construcción [Complejidad: simple]</b>	0,3	432.532,95 €
<b>Contingencias</b>	0,1	144.177,65 €
<b>TOTAL</b>		<b>1.153.421,20 €</b>

Tabla 47 - Estimación de costos de Ingeniería y construcción, edificios y contingencias – Alternativa A

#### Costos indirectos – Puesta en marcha de la planta y prueba

En este análisis de la puesta en marcha, se consideró como un gasto único en el primer año de operación de la planta o como parte de la inversión de capital total. Los costos de puesta en marcha contemplan los siguientes factores: Costos de prueba; son aquellos que devienen de la operación de la planta hasta su óptima capacidad, o hasta que se ha demostrado que la planta funciona a la capacidad de diseño durante cierto período determinado de tiempo y se obtiene producto en las especificaciones establecidas. Se calculará como el costo de operación para tres días de producción, estimados de prueba. En este periodo de prueba, se contemplan las materias primas necesarias para lograr el estado estacionario, lograr 3 días completos de producción y obtener los tanques de almacenamiento al máximo de su capacidad.

Con respecto a los precios de las materias primas, en cuanto al Tolueno se obtuvo el valor del mercado en España en la web “The plaza group” [20]. Respecto al n-Hexano, los precios se obtuvieron de la web comercial “Alibaba.com” [21]. El agente de limpieza, en este caso detergente se obtuvo de la misma web que el n-Hexano [21]. Por último, para el caso del Hipoclorito de Sodio, el precio se obtuvo del proveedor “Vadequímica” [22].

Costo de materia prima puesta en marcha							
Materia prima	Costo (€/tn)	Consumo por hora (tn/hr)	Materia prima para lograr estado estacionario (tn)	Materia prima para prueba 3 días (tn)	Materia prima puesta en marcha (tn)	Costo TOTAL (€)	Producto
Tolueno	817,60 €	0,43	27,09	31,26	58,36	<b>47.711,40 €</b>	Tolueno pureza industrial
n-Hexano	900,00 €	0,21	61,41	15,14	76,55	<b>68.893,02 €</b>	n-Hexano grado industrial
Detergente	800,00 €	0,01	14,40	0,72	15,12	<b>12.096,00 €</b>	Detergente de grado 70%
Hipoclorito de Sodio	850,00 €	0,01	14,40	0,72	15,12	<b>12.852,00 €</b>	Hipoclorito de Sodio grado lejía industrial
<b>TOTAL</b>						<b>141.552,41 €</b>	

Tabla 48 - Resumen costos indirectos (puesta en marcha y prueba) - Alternativa A

Costos de capital fijo		
<b>Costos directos</b>	Equipos	1.441.776,50 €
	Instalación	865.065,90 €
	Tuberías	115.342,12 €
	Instrumentación	72.088,83 €
	Servicios auxiliares	216.266,48 €
<b>Subtotal costos directos</b>		<b>2.710.539,82 €</b>
<b>Costos indirectos</b>	Ingeniería y construcción	432.532,95 €
	Edilicios y preparación del terreno	576.710,60 €
	Contingencias	144.177,65 €
	Puesta en marcha y prueba	141.552,41 €
<b>Subtotal costos indirectos</b>		<b>1.294.973,61 €</b>
<b>TOTAL Costos de capital fijo</b>		<b>4.005.513,43 €</b>

Tabla 49 – Resumen costos totales de capital fijo - Alternativa A

## 7.1.2 Presupuesto de Operación – Alternativa A

Se procede a la estimación del capital necesario para el funcionamiento de la planta. La suma del capital fijo y el capital de operación proporciona el valor de la inversión total necesaria para realizar el proyecto, clave para evaluar la factibilidad económica.

Si bien existen diferentes formas de calcular el presupuesto de operación, en este trabajo se opta por separar en *costos directos de producción*, que engloba a las materias primas e insumos, mano de obra directa, servicios auxiliares y costos de mantenimiento y reparación. Y por otro lado los *costos indirectos de producción* que están compuestos por seguros, impuestos y costos de venta y distribución.

Para realizar este análisis, se tomará como referencia el costo anual de operación, dado que atenúa los efectos debidos a variaciones estacionales y considera el tiempo de parada de planta.

### Costos directos de producción

#### Costos directos – Materias Primas e insumos

Se detallan, a continuación, los requerimientos anuales de las materias primas, según lo analizado en el balance de masa del proyecto. Como se mencionó anteriormente, este análisis contempla 300 días operativos al año, una operación continua de tres turnos, con un 80% de horas operativas (debido a paradas programadas, cambios de turno, etc.).

Materia prima	Caudal necesario (tn/año)	Costo (€/tn)	Costo total
<b>Tolueno</b>	2500,92	817,60 €	2.044.756,74 €
<b>n-Hexano</b>	1211,32	900,00	1.090.191,31 €
Insumo	Caudal necesario (tn/año)	Costo (€/tn)	Costo total
<b>Detergente</b>	57,60	800,00	46.080,00 €
<b>Hipoclorito de Sodio</b>	57,60	850,00	48.960,00 €
<b>TOTAL</b>			<b>3.229.988,05 €</b>

Tabla 50 - Resumen costo anual de materia prima e insumos - Alternativa A

#### Costos directos – Mano de obra directa

La mano de obra directa incluye al personal que interviene en la operación, en el caso de este proyecto se estiman para cubrir los 3 turnos 6 operarios.

Área	Cargo	Cantidad	Sueldo bruto (€/año)	Contribución (€/año)	Total anual
<b>Operación</b>	Operario	6	24.000 €	4.800 €	<b>172.800 €</b>

Tabla 51 - Resumen mano de obra directa - Alternativa A

#### Costos directos – Servicios auxiliares

A continuación, se detallan los servicios auxiliares. Para el cálculo del gas se obtuvo el caudal necesario del balance de energía, los costos se estimaron del mercado ibérico del gas [23]. Para el caso del agua, los costos se obtuvieron de emasesa (Empresa Metropolitana Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla) [24], siendo los costos más actualizados por metro cúbico industrial, y por último, para la electricidad se estimaron un uso de 2kWh por bomba (8 bombas en total para cubrir los 2 mezcladores, los 2 tanques de materia prima y las 4 necesarias para la columna de destilación), 20kWh por cada secadora y 30kWh en el condensador de la columna de destilación, a todo esto se le agregaron 50kWh por iluminación y oficinas. Los costos se obtuvieron de la red eléctrica de España [25].

Servicio	Costo [€/m³]	Consumo por año [m³]	Costo anual [€/m³]
<b>Agua</b>	0,74 €	2189	1.608,77 €
<b>Gas</b>	1,13 €	7,46*10 <sup>5</sup>	843.375,24 €
Servicio	Costo [€/kWh]	Consumo [kWh]	Costo anual [€/año]
<b>Electricidad</b>	0,19 €	136,00	152.105,01 €
<b>TOTAL</b>			<b>997.089,02 €</b>

Tabla 52 - Resumen costos de servicios auxiliares - Alternativa A

### Costos directos – Mantenimiento y Reparación

El costo derivado del mantenimiento hace referencia a los mantenimientos realizados durante las paradas anuales, la sustitución de piezas o reparaciones por posibles problemas. Según diferente bibliografía consultada, el rango típico recomendado va desde un 2% a un 20% anual del costo de los equipos. Para este proceso se opta por trabajar con un 5%.

<b>Costo mantenimiento anual</b>	
<b>TOTAL</b>	72.088,83 €

Tabla 53 - Resumen costo de mantenimiento anual - Alternativa A

### Costos indirectos de producción

Estos costos se pueden resumir en:

#### Costos indirectos – Seguros

En este apartado se incluyen los costos referentes a seguros sobre instalaciones fijas, edificios, maquinarias, materias primas, productos finales, y otros. Los mismos varían de acuerdo con el tipo de actividad que se realiza, y al tipo de cobertura requerida. Por otro lado, se encuentran los seguros asociados a la protección de los trabajadores (ART), el mismo es un seguro obligatorio, cuyo fin es el de cubrir los accidentes laborales. En este caso, se considerará 2 % de la inversión del capital fijo.

#### Costos indirectos – Impuestos

Los impuestos a la propiedad dependen de la localidad donde se encuentra ubicada la planta y las leyes que rigen en esa zona. Para plantas industriales en España se pueden considerar entre el 2 y el 4 % de la inversión de capital fijo, en este caso se adoptó un 2%.

#### Costos indirectos – Costos de venta y distribución

Aquí se incluye todo lo relacionado con la distribución y venta del producto, suministros, comisiones, viáticos, publicidad y servicios técnicos de ventas. El costo de distribución y ventas se estima en un 2% del costo total del producto.

### Resumen del costo total de producción

En la siguiente tabla se puede observar el resumen de los costos directos e indirectos de producción que sumados ilustran el costo total de producción anual:

<b>Resumen costos de producción</b>			
<b>Concepto</b>		<b>Costo</b>	
<b>Costos de producción</b>	<b>Directos</b>	Materias primas e insumos	3.229.988,05 €
		Mano de obra directa	172.800 €
		Servicios auxiliares	997.089,02 €
		Mantenimiento y reparación	72.088,83 €
	<b>Indirectos</b>	Seguros	80.110,27 €
		Impuestos	80.110,27 €
		Costos de venta y distribución	94.534,42 €
<b>TOTAL</b>		<b>4.726.720,86 €</b>	

Tabla 54 - Resumen costo total de producción - Alternativa A

## 7.2 Ingresos – Alternativa A

En el capítulo anterior se mencionó la capacidad de materia prima, la cual estableció el dimensionamiento de la planta. En esta sección se obtuvo el precio del producto al que puede salir al mercado para realizar un análisis de viabilidad económica del proyecto.

### Precio de venta

El precio de venta del producto se obtuvo de realizar un promedio de tres compañías que comercializan el producto en Europa Occidental (Hongjun New Material Technology Co [26], Teshang Technology Co [27] y Zhuzun Trading Co. Ltd. [28]). El promedio resultó de 841,00 € la tonelada. Para ser competitivo en el mercado, ya que ingresaremos como nuevos competidores, se realizó el estudio fijando el precio en un 30% menor a la competencia, es decir 588,70 € por tonelada.

Precio de venta			
Producto	Producción [tn/año]	Precio de venta [€/tn]	Ingreso anual [€/año]
<b>LDPE Reciclado</b>	16.150,98	588,70 €	<b>9.508.083,34 €</b>

Tabla 55 - Resumen precio de venta - Alternativa A

### Ingresos por ventas

Se estima que el ingreso por ventas será gradual, siendo el 50% el primer año, 75% el segundo y a partir del tercer año todo lo producido es vendido.

Producto	Año	Venta [tn/año]	Precio de venta [€/tn]	Ingreso por año [€/año]
<b>LDPE Reciclado</b>	1	8.075,49	588,70 €	<b>4.754.041,67 €</b>
	2	12.113,24		<b>7.131.062,50 €</b>
	3...n	16.150,98		<b>9.508.083,34 €</b>

Tabla 56 - Resumen ingresos por ventas - Alternativa A

### Beneficio neto

De acuerdo con los análisis previos, se puede deducir el beneficio neto total considerando los ingresos por venta graduales explicados en el inciso anterior.

Beneficio neto			
Año	Ingreso bruto año [€/año]	Costo de producción [€/año]	Beneficio neto [€/año]
<b>1</b>	4.754.041,67 €	2.363.360,43 €	<b>2.390.681,24 €</b>
<b>2</b>	7.131.062,50 €	3.545.040,64 €	<b>3.586.021,86 €</b>
<b>3...n</b>	9.508.083,34 €	4.726.720,86 €	<b>4.781.362,48 €</b>

Tabla 57 - Resumen beneficio neto - Alternativa A

## 7.3 Presupuesto de Inversión – Alternativa B

Se realizará una estimación preliminar que tiene como fin brindar los requisitos básicos y obtener una aproximación del capital necesario para el desarrollo de la planta.

### 7.3.1 Capital Fijo – Alternativa B

Para la alternativa B se realizó el mismo análisis que para la alternativa A. Es decir, los costos fijos se clasificaron en directos e indirectos.

#### **Costos directos**

##### Costos directos - Equipos

La estimación de los costos de compra de los equipos del proceso y tanques de almacenamiento fueron obtenidos a partir del promedio entre dos bases de datos, la primera “McGraw Hill Higher Education Online” [15] y la segunda “Matche” [16]. Algunos equipos fueron obtenidos directamente de fuentes de otros trabajos similares, y en el caso de la columna de destilación el software ChemSep ya se pueden obtener valores estimados del costo.

Equipo	Matche	McGraw Hill (€)	Promedio	Características del equipo
Triturador (T1)	302.300,00 €	67.185,00 €	184.742,50 €	Trituradora de rodillo, capacidad de 3500kg/hr
Triturador (T2)	302.300,00 €	67.185,00 €	184.742,50 €	Trituradora de rodillo, capacidad de 3500kg/hr
Separador por tamices (S1)	23.100,00 €	15.168,00 €	19.134,00 €	Tamiz vibratorio de 1,5m <sup>2</sup>
Limpieza (L1)	6.800,00 €	10.982,00 €	8.891,00 €	Tornillo transportador de 40 cm de diámetro y 5 metros de largo
Limpieza (L2)	6.800,00 €	10.982,00 €	8.891,00 €	Tornillo transportador de 40 cm de diámetro y 5 metros de largo
Limpieza (L3)	6.800,00 €	10.982,00 €	8.891,00 €	Tornillo transportador de 40 cm de diámetro y 5 metros de largo
Tanque (TK1)	15.700,00 €	26.933,00 €	21.316,50 €	Tanque acero al carbono para 72 horas de funcionamiento (14,4m <sup>3</sup> )
Tanque (TK2)	15.700,00 €	26.933,00 €	21.316,50 €	Tanque acero al carbono para 72 horas de funcionamiento (14,4m <sup>3</sup> )
Tanque (TK3)	15.700,00 €	26.933,00 €	21.316,50 €	Tanque acero al carbono para 72 horas de funcionamiento (14,4m <sup>3</sup> )
Tanque (TK4)	4.900,00 €	14.177,00 €	9.538,50 €	Tanque acero al carbono para 72 horas de funcionamiento (20m <sup>3</sup> )
Tanque (TK5)	4.000,00 €	12.373,00 €	8.186,50 €	Tanque acero al carbono para 72 horas de funcionamiento (15m <sup>3</sup> )
Secador (D1)	-	-	13.600,00 €	Se tomó el precio de un proceso similar de secado de plástico [17]
Secador (D2)	-	-	13.600,00 €	Se tomó el precio de un proceso similar de secado de plástico [17]
Mezclador (M1)	161.600,00 €	102.246,00 €	131.923,00 €	Tanque mezclador con un 25% de sobredimensionamiento (30m <sup>3</sup> )
Mezclador (M2)	209.100,00 €	105.707,00 €	157.403,50 €	Tanque mezclador con un 25% de sobredimensionamiento (60m <sup>3</sup> )
Dilución (R1)	161.600,00 €	102.246,00 €	131.923,00 €	Tanque mezclador con un 25% de sobredimensionamiento (60m <sup>3</sup> )
Precipitador P1	-	-	9.475,00 €	Se tomó el precio de un proceso similar de reciclado de plástico, tanque decantador. [17]
Filtro (F1)	195.300,00 €	140.617,00 €	167.958,50 €	El área se tomó de tabla de especificaciones de fabricante de filtro de tambor rotatorio. (A=12m <sup>2</sup> ) [18]
Filtro (F2)	236.100,00 €	173.868,00 €	204.984,00 €	El área se tomó de tabla de especificaciones de fabricante de filtro de tambor rotatorio. (A=20m <sup>2</sup> ) [18]
Columna (C1)	-	-	113.943,00 €	El costo de la torre se tomó directamente del software de diseño "ChemSep" en donde incluye tanto la carcasa como el relleno y cañerías.
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>1.441.776,50 €</b>	

Tabla 58 - Resumen costos directos - Alternativa B

### Costos directos – Instalación, cañerías, aislamiento e instrumentación y control

Para estimar estos costos, se utilizó el método de los “Factores de Chilton” [19]. El método de Chilton parte del valor del equipo instalado y pondera el valor del resto de costes de la instalación por unos factores medios.

<b>Instalación, cañerías, aislamiento e instrumentación y control</b>		
<b>Concepto</b>	<b>Factor de Chilton</b>	<b>Coste</b>
<b>Coste de instalación</b>	0,6	865.065,90 €
<b>Tubería de proceso [Tipo de planta: Sólido/líquidos]</b>	0,08	115.342,12 €
<b>Instrumentación [Automatización: simple]</b>	0,05	72.088,83 €
<b>Equipos auxiliares</b>	0,15	216.266,48 €
<b>TOTAL</b>		<b>1.268.763,32 €</b>

Tabla 59 - Estimación de costos de instrumentación, cañerías, aislamiento e instrumentación y control – Alternativa B

### Costos indirectos

#### Costos indirectos - Ingeniería y construcción, edificios, contingencia

Para este caso, también se utilizaron factores de Chilton [19]:

<b>Ingeniería y construcción, edificios y contingencias</b>		
<b>Concepto</b>	<b>Factor de Chilton</b>	<b>Coste</b>
<b>Edificios y preparación del terreno [Tipo de planta: mixta]</b>	0,4	576.710,60 €
<b>Ingeniería y construcción [Complejidad: simple]</b>	0,3	432.532,95 €
<b>Contingencias</b>	0,1	144.177,65 €
<b>TOTAL</b>		<b>1.153.421,20 €</b>

Tabla 60 - Estimación de costos de Ingeniería y construcción, edificios y contingencias – Alternativa B

#### Costos indirectos – Puesta en marcha de la planta y prueba

En este análisis de la puesta en marcha, se consideró como un gasto único en el primer año de operación de la planta o como parte de la inversión de capital total. Los costos de puesta en marcha contemplan los siguientes factores: Costos de prueba; son aquellos que devienen de la operación de la planta hasta su óptima capacidad, o hasta que se ha demostrado que la planta funciona a la capacidad de diseño durante cierto período determinado de tiempo y se obtiene producto en las especificaciones establecidas. Se calculará como el costo de operación para tres días de producción, estimados de prueba. En este periodo de prueba, se contemplan las materias primas necesarias para lograr el estado estacionario, lograr 3 días completos de producción y obtener los tanques de almacenamiento al máximo de su capacidad.

Con respecto a los precios de las materias primas, en cuanto al Xileno se obtuvo el valor del mercado en España en la web “The plaza group” [20]. Respecto al n-Hexano, los precios se obtuvieron de la web comercial “Alibaba.com” [21]. El agente de limpieza, en este caso detergente se obtuvo de la misma web que el n-Hexano [21]. Por último, para el caso del Hipoclorito de Sodio, el precio se obtuvo del proveedor “Vadequímica” [22].

Costo de materia prima puesta en marcha							
Materia prima	Costo (€/tn)	Consumo por hora (tn/hr)	Materia prima para lograr estado estacionario (tn)	Materia prima para prueba 3 días (tn)	Materia prima puesta en marcha (tn)	Costo TOTAL (€)	Producto
Xileno	820,97 €	0,44	27,09	31,40	58,49	<b>48.022,30 €</b>	Tolueno pureza industrial
n-Hexano	900,00 €	0,21	61,55	15,28	76,83	<b>69.146,33 €</b>	n-Hexano grado industrial
Detergente	800,00 €	0,01	14,40	0,72	15,12	<b>12.096,00 €</b>	Detergente de grado 70%
Hipoclorito de Sodio	850,00 €	0,01	14,40	0,72	15,12	<b>12.852,00 €</b>	Hipoclorito de Sodio grado lejía industrial
<b>TOTAL</b>						<b>142.116,64 €</b>	

Tabla 61 - Resumen costos indirectos (puesta en marcha y prueba) - Alternativa B

Costos de capital fijo		
<b>Costos directos</b>	Equipos	1.441.776,50 €
	Instalación	865.065,90 €
	Tuberías	115.342,12 €
	Instrumentación	72.088,83 €
	Servicios auxiliares	216.266,48 €
<b>Subtotal costos directos</b>		<b>2.710.539,82 €</b>
<b>Costos indirectos</b>	Ingeniería y construcción	432.532,95 €
	Edilicios y preparación del terreno	576.710,60 €
	Contingencias	144.177,65 €
	Puesta en marcha y prueba	142.116,64 €
<b>Subtotal costos indirectos</b>		<b>1.295.537,84 €</b>
<b>TOTAL Costos de capital fijo</b>		<b>4.006.077,66 €</b>

Tabla 62 – Resumen costos totales de capital fijo - Alternativa B

### 7.3.2 Presupuesto de Operación – Alternativa B

Se procede a la estimación del capital necesario para el funcionamiento de la planta. La suma del capital fijo y el capital de operación proporciona el valor de la inversión total necesaria para realizar el proyecto, clave para evaluar la factibilidad económica.

Si bien existen diferentes formas de calcular el presupuesto de operación, en este trabajo se opta por separar en *costos directos de producción*, que engloba a las materias primas e insumos, mano de obra directa, servicios auxiliares y costos de mantenimiento y reparación. Y por otro lado los *costos indirectos de producción* que están compuestos por seguros, impuestos y costos de venta y distribución.

Para realizar este análisis, se tomará como referencia el costo anual de operación, dado que atenúa los efectos debidos a variaciones estacionales y considera el tiempo de parada de planta.

### Costos directos de producción

#### Costos directos – Materias Primas e insumos

Se detallan, a continuación, los requerimientos anuales de las materias primas, según lo analizado en el balance de masa del proyecto. Como se mencionó anteriormente, este análisis contempla 300 días operativos al año, una operación continua de tres turnos, con un 80% de horas operativas (debido a paradas programadas, cambios de turno, etc.).

Materia prima	Caudal necesario (tn/año)	Costo (€/tn)	Costo total
<b>Xileno</b>	2512,07	820,97 €	2.062.334,54 €
<b>n-Hexano</b>	1222,48	900,00	1.100.234,02 €
Insumo	Caudal necesario (tn/año)	Costo (€/tn)	Costo total
<b>Detergente</b>	57,60	800,00	46.080,00 €
<b>Hipoclorito de Sodio</b>	57,60	850,00	48.960,00 €
<b>TOTAL</b>			<b>3.257.608,56 €</b>

Tabla 63 - Resumen costo anual de materia prima e insumos - Alternativa B

#### Costos directos – Mano de obra directa

La mano de obra directa incluye al personal que interviene en la operación, en el caso de este proyecto se estiman para cubrir los 3 turnos 6 operarios.

Área	Cargo	Cantidad	Sueldo bruto (€/año)	Contribución (€/año)	Total anual
<b>Operación</b>	Operario	6	24.000 €	4.800 €	<b>172.800 €</b>

Tabla 64 - Resumen mano de obra directa - Alternativa B

#### Costos directos – Servicios auxiliares

A continuación, se detallan los servicios auxiliares. Para el cálculo del gas se obtuvo el caudal necesario del balance de energía, los costos se estimaron del mercado ibérico del gas [23]. Para el caso del agua, los costos se obtuvieron de emasesa (Empresa Metropolitana Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla) [24], siendo los costos más actualizados por metro cúbico industrial, y por último, para la electricidad se estimaron un uso de 2kWh por bomba (8 bombas en total para cubrir los 2 mezcladores, los 2 tanques de materia prima y las 4 necesarias para la columna de destilación), 20kWh por cada secadora y 30kWh en el condensador de la columna de destilación, a todo esto se le agregaron 50kWh por iluminación y oficinas. Los costos se obtuvieron de la red eléctrica de España [25].

Servicio	Costo [€/m³]	Consumo por año [m³]	Costo anual [€/m³]
<b>Agua</b>	0,74 €	2189	1.608,77 €
<b>Gas</b>	1,13 €	1,36*10 <sup>6</sup>	1.541.582,16 €
Servicio	Costo [€/kWh]	Consumo [kWh]	Costo anual [€/año]
<b>Electricidad</b>	0,19	136,00	152.105,01 €
<b>TOTAL</b>			<b>1.695.295,94 €</b>

Tabla 65 - Resumen costos de servicios auxiliares - Alternativa B

### Costos directos – Mantenimiento y Reparación

El costo derivado del mantenimiento hace referencia a los mantenimientos realizados durante las paradas anuales, la sustitución de piezas o reparaciones por posibles problemas. Según diferente bibliografía consultada, el rango típico recomendado va desde un 2% a un 20% anual del costo de los equipos. Para este proceso se opta por trabajar con un 5%.

<b>Costo mantenimiento anual</b>	
<b>TOTAL</b>	72.088,83 €

Tabla 66 - Resumen costo de mantenimiento anual - Alternativa A

### Costos indirectos de producción

Estos costos se pueden resumir en:

#### Costos indirectos – Seguros

En este apartado se incluyen los costos referentes a seguros sobre instalaciones fijas, edificios, maquinarias, materias primas, productos finales, y otros. Los mismos varían de acuerdo con el tipo de actividad que se realiza, y al tipo de cobertura requerida. Por otro lado, se encuentran los seguros asociados a la protección de los trabajadores (ART), el mismo es un seguro obligatorio, cuyo fin es el de cubrir los accidentes laborales. En este caso, se considerará 2 % de la inversión del capital fijo.

#### Costos indirectos – Impuestos

Los impuestos a la propiedad dependen de la localidad donde se encuentra ubicada la planta y las leyes que rigen en esa zona. Para plantas industriales en España se pueden considerar entre el 2 y el 4 % de la inversión de capital fijo, en este caso se adoptó un 2%.

#### Costos indirectos – Costos de venta y distribución

Aquí se incluye todo lo relacionado con la distribución y venta del producto, suministros, comisiones, viáticos, publicidad y servicios técnicos de ventas. El costo de distribución y ventas se estima en un 2% del costo total del producto.

### Resumen del costo total de producción

En la siguiente tabla se puede observar el resumen de los costos directos e indirectos de producción que sumados ilustran el costo total de producción anual:

<b>Resumen costos de producción</b>			
<b>Concepto</b>		<b>Costo</b>	
<b>Costos de producción</b>	<b>Directos</b>	Materias primas e insumos	3.257.608,56 €
		Mano de obra directa	172.800 €
		Servicios auxiliares	1.695.295,94 €
		Mantenimiento y reparación	72.088,83 €
	<b>Indirectos</b>	Seguros	80.121,55 €
		Impuestos	80.121,55 €
		Costos de venta y distribución	109.347,68 €
<b>TOTAL</b>		<b>5.467.384,10 €</b>	

Tabla 67 - Resumen costo total de producción - Alternativa B

## 7.4 Ingresos – Alternativa B

En el capítulo anterior se mencionó la capacidad de materia prima, la cual estableció el dimensionamiento de la planta. En esta sección se obtuvo el precio del producto al que puede salir al mercado para realizar un análisis de viabilidad económica del proyecto.

### Precio de venta

El precio de venta del producto se obtuvo de realizar un promedio de tres compañías que comercializan el producto en Europa Occidental (Hongjun New Material Technology Co [26], Teshang Technology Co [27] y Zhuzun Trading Co. Ltd. [28]). El promedio resultó de 841,00 € la tonelada. Para ser competitivo en el mercado, ya que ingresaremos como nuevos competidores, se realizó el estudio fijando el precio en un 30% menor a la competencia, es decir 588,70 € por tonelada.

Precio de venta			
Producto	Producción [tn/año]	Precio de venta [€/tn]	Ingreso anual [€/año]
<b>LDPE Reciclado</b>	16.299,76	588,70 €	<b>9.595.670,60 €</b>

Tabla 68 - Resumen precio de venta - Alternativa B

### Ingresos por ventas

Se estima que el ingreso por ventas será gradual, siendo el 50% el primer año, 75% el segundo y a partir del tercer año todo lo producido es vendido.

Producto	Año	Venta [tn/año]	Precio de venta [€/tn]	Ingreso por año [€/año]
<b>LDPE Reciclado</b>	1	8.149,88	588,70 €	<b>4.797.835,30 €</b>
	2	12.224,82		<b>7.196.752,95 €</b>
	3...n	16.299,76		<b>9.595.670,60 €</b>

Tabla 69 - Resumen ingresos por ventas - Alternativa B

### Beneficio neto

De acuerdo con los análisis previos, se puede deducir el beneficio neto total considerando los ingresos por venta graduales explicados en el inciso anterior.

Beneficio neto			
Año	Ingreso bruto año [€/año]	Costo de producción [€/año]	Beneficio neto [€/año]
<b>1</b>	4.797.835,30 €	2.733.692,05 €	<b>2.064.143,25 €</b>
<b>2</b>	7.196.752,95 €	4.100.538,08 €	<b>3.096.214,87 €</b>
<b>3...n</b>	9.595.670,60 €	5.467.384,10 €	<b>4.128.286,49 €</b>

Tabla 70 - Resumen beneficio neto - Alternativa B

## 7.5 Resumen de costos e ingresos de alternativas

Para ilustrar de manera más sencilla, a continuación, se expone una tabla resumen de los costos de capital fijo, de operación e ingresos de ambas alternativas:

Concepto		Alternativa A	Alternativa B	
Costos de capital	Costos directos	Equipos	1.441.776,50 €	1.441.776,50 €
		Instalación	865.065,90 €	865.065,90 €
		Tuberías	115.342,12 €	115.342,12 €
		Instrumentación	72.088,83 €	72.088,83 €
		Servicios auxiliares	216.266,48 €	216.266,48 €
	Costos indirectos	Ingeniería y construcción	432.532,95 €	432.532,95 €
		Edilicios y preparación del terreno	576.710,60 €	576.710,60 €
		Contingencias	144.177,65 €	144.177,65 €
		Puesta en marcha y prueba	141.552,41 €	142.116,64 €
<b>Total costos de capital</b>		<b>4.005.513,43 €</b>	<b>4.006.077,66 €</b>	
Costos de producción	Directos	Materias primas e insumos	3.229.988,05 €	3.257.608,56 €
		Mano de obra directa	172.800,00 €	172.800,00 €
		Servicios auxiliares	997.089,02 €	1.695.295,94 €
		Mantenimiento y reparación	72.088,83 €	72.088,83 €
	Indirectos	Seguros	80.110,27 €	80.121,55 €
		Impuestos	80.110,27 €	80.121,55 €
		Costos de venta y distribución	94.534,42 €	109.347,68 €
<b>Total costos de producción (anuales)</b>		<b>4.726.720,86 €</b>	<b>5.467.384,10 €</b>	
Ingresos	Año 1	4.754.041,67 €	4.797.835,30 €	
	Año 2	7.131.062,50 €	7.196.752,95 €	
	Año 3..n	<b>9.508.083,34 €</b>	<b>9.595.670,60 €</b>	
Beneficio neto	Año 1	2.390.681,24 €	2.064.143,25 €	
	Año 2	3.586.021,86 €	3.096.214,87 €	
	<b>Año 3..n</b>	<b>4.781.362,48 €</b>	<b>4.128.286,49 €</b>	

Tabla 71 - Resumen de costos de capital, de operación e ingresos

## **7.6 Financiamiento y Rentabilidad – Alternativa A y B**

En esta sección se evaluará la factibilidad de la realización del proyecto, es decir la conveniencia o no de la puesta en marcha del proyecto. Analizando de donde proveer los fondos iniciales y realizando un análisis del valor actualizado neto y de la tasa interna de retorno comparando las dos alternativas.

### **7.6.1 Financiamiento**

Para el financiamiento del proyecto, se opta por obtener el crédito. Para el financiamiento de este, se realizó una búsqueda en el mercado de un crédito de estas características, de esta búsqueda se obtuvo una TAE (Tasa Anual Equivalente) del 7,245% en el caso de que se financie en 10 años con un año de carencia [29]. Para el caso de ambas alternativas, la inversión sería del capital fijo, este número se encuentra cercano a los 4.000.000,00 € para ambas alternativas. Por lo que se estimó un préstamo de 4.000.000,00€ a retirar en el año 0 del proyecto.

### **7.6.2 Flujo de fondos**

El flujo de fondos es el resumen de entradas y salidas de dinero de la empresa en un período dado. A partir del mismo se puede determinar la viabilidad de los proyectos de inversión, utilizando los cálculos del Valor Actual Neto (VAN) y de la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Flujo de fondos						
Descripción	Año					
	0	1	2	3	4	5
<b>Ingresos</b>	4.000.000,00 €	4.754.041,67 €	7.131.062,50 €	9.508.083,34 €	9.508.083,34 €	9.508.083,34 €
<b>Egresos</b>						
<b>Inversión</b>	4.005.513,43 €					
<b>Costos de producción</b>		-2.363.360,43 €	-3.545.040,64 €	-4.726.720,86 €	-4.726.720,86 €	-4.726.720,86 €
<b>Egresos financieros</b>		-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €
<b>Egresos fiscales (IVA=21%)</b>		-502.043,06 €	-753.064,59 €	-1.004.086,12 €	-1.004.086,12 €	-1.004.086,12 €
<b>Subtotal egresos</b>		-3.155.203,49 €	-4.587.905,23 €	-6.020.606,98 €	-6.020.606,98 €	-6.020.606,98 €
<b>Flujo de fondos neto</b>	<b>-5.513,43 €</b>	<b>1.598.838,18 €</b>	<b>2.543.157,27 €</b>	<b>3.487.476,36 €</b>	<b>3.487.476,36 €</b>	<b>3.487.476,36 €</b>
Descripción	Año					
	6	7	8	9	10	
<b>Ingresos</b>	9.508.083,34 €	9.508.083,34 €	9.508.083,34 €	9.508.083,34 €	9.508.083,34 €	
<b>Egresos</b>						
<b>Inversión</b>						
<b>Costos de producción</b>	-4.726.720,86 €	-4.726.720,86 €	-4.726.720,86 €	-4.726.720,86 €	-4.726.720,86 €	-4.726.720,86 €
<b>Egresos financieros</b>	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €
<b>Egresos fiscales (IVA=21%)</b>	-1.004.086,12 €	-1.004.086,12 €	-1.004.086,12 €	-1.004.086,12 €	-1.004.086,12 €	-1.004.086,12 €
<b>Subtotal egresos</b>	-6.020.606,98 €	-6.020.606,98 €	-6.020.606,98 €	-6.020.606,98 €	-6.020.606,98 €	-6.020.606,98 €
<b>Flujo de fondos neto</b>	<b>3.487.476,36 €</b>					

Tabla 72 - Flujo de fondos - Alternativa A

Flujo de fondos						
Descripción	Año					
	0	1	2	3	4	5
<b>Ingresos</b>	4.000.000,00 €	4.797.835,30 €	7.196.752,95 €	9.595.670,60 €	9.595.670,60 €	9.595.670,60 €
<b>Egresos</b>						
<b>Inversión</b>	4.006.077,66 €					
<b>Costos de producción</b>		-2.733.692,05 €	-4.100.538,08 €	-5.467.384,10 €	-5.467.384,10 €	-5.467.384,10 €
<b>Egresos financieros</b>		-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €
<b>Egresos fiscales (IVA=21%)</b>		-433.470,08 €	-650.205,12 €	-866.940,16 €	-866.940,16 €	-866.940,16 €
<b>Subtotal egresos</b>		-3.456.962,13 €	-5.040.543,20 €	-6.624.124,27 €	-6.624.124,27 €	-6.624.124,27 €
<b>Flujo de fondos neto</b>	<b>-6.077,66 €</b>	<b>1.340.873,16 €</b>	<b>2.156.209,75 €</b>	<b>2.971.546,33 €</b>	<b>2.971.546,33 €</b>	<b>2.971.546,33 €</b>
Descripción	Año					
	6	7	8	9	10	
<b>Ingresos</b>	9.595.670,60 €	9.595.670,60 €	9.595.670,60 €	9.595.670,60 €	9.595.670,60 €	
<b>Egresos</b>						
<b>Inversión</b>						
<b>Costos de producción</b>	-5.467.384,10 €	-5.467.384,10 €	-5.467.384,10 €	-5.467.384,10 €	-5.467.384,10 €	-5.467.384,10 €
<b>Egresos financieros</b>	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €	-289.800,00 €
<b>Egresos fiscales (IVA=21%)</b>	-866.940,16 €	-866.940,16 €	-866.940,16 €	-866.940,16 €	-866.940,16 €	-866.940,16 €
<b>Subtotal egresos</b>	-6.624.124,27 €	-6.624.124,27 €	-6.624.124,27 €	-6.624.124,27 €	-6.624.124,27 €	-6.624.124,27 €
<b>Flujo de fondos neto</b>	<b>2.971.546,33 €</b>					

Tabla 73 - Flujo de fondos - Alternativa B

Para determinar la rentabilidad del proyecto en el largo plazo, se utilizaron los criterios de evaluación denominados Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), para esto se considera el flujo de fondo neto, que es la diferencia entre los ingresos y los egresos de la empresa. El VAN consiste en llevar el flujo futuro de fondos a términos de moneda del momento inicial. Esto se consigue por medio de la aplicación a cada uno de los valores del flujo de fondos del coeficiente surgido de la fórmula de actualización, y sumando luego algebraicamente los resultados:

$$VAN = \sum_{i=0}^n \frac{F_n}{(1+i)^n} \text{ Donde:}$$

$F_n$  Representa a cada valor del flujo futuro de fondos.

$i$  Corresponde a la tasa de interés de descuento.

$n$  Representa los períodos correspondientes al flujo de fondos.

Por su parte, la Tasa Interna de Retorno (TIR) permite descontar los flujos netos de operación de un proyecto e igualarlos a la inversión inicial. La TIR es la tasa de interés para la cual el valor actual del flujo de beneficios se hace cero (es decir, VAN = 0).

$$0 = \sum_{i=0}^n \frac{F_n}{(1 + TIR)^n}$$

Como se explicó anteriormente, en el caso del proyecto para que sea viable se opta por poseer una VAN positiva, es decir mayor a cero y una TIR superior al 10%. Por otra parte, la alternativa que posea una VAN y un TIR mayores es la más viable económicamente es.

Los resultados obtenidos de ambas alternativas pueden observarse a continuación:

<b>Nombre del proyecto:</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>
<b>TNA de inversión alternativa</b>	5%	5%
<b>Periodicidad</b>	Anual	Anual
<b>Cantidad de períodos</b>	10	10
<b>TIR</b>	<b>63%</b>	<b>54%</b>
<b>VAN</b>	<b>20.268.626,33 €</b>	<b>16.646.859,05 €</b>

Tabla 74 - Resumen VAN y TIR - Alternativas A y B

## 7.7 Conclusiones económicas y financieras de las alternativas

Tal como puede observarse en la tabla 72, para el caso de la alternativa "A", el flujo de fondos teniendo en cuenta la inversión inicial es siempre positivo. A su vez, se puede realizar el pago a nuestros acreedores, tomando en cuenta los costos financieros y lograr un beneficio neto positivo desde el primer año. Esto nos lleva a obtener una TIR que supera en más de 6 veces al valor de referencia para llevar a cabo un proyecto de este tipo (Tabla 74).

En la misma tabla, se puede observar que el VAN es positiva, por lo que también podemos afirmar que el proyecto será viable tanto económica como financieramente.

Realizando la misma observación en la tabla 73, para el caso de la alternativa "B", también posee valores altos de TIR y VAN, pero ambos menores a la alternativa A. Por lo que a priori se podría concluir que económica y financieramente, según este análisis y estas suposiciones, la alternativa "A" posee un mejor desempeño económico que la alternativa "B".

# 8 ANÁLISIS DEL PROYECTO: INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR

---

## 8.1 Plan de acción de Economía Circular

Continuando con los esfuerzos iniciados en 2015, la Comisión Europea ha adoptado recientemente un nuevo Plan de Acción sobre la Economía Circular, que constituye uno de los principales elementos incluidos en el Pacto Verde Europeo (European Green Deal), el nuevo programa de Europa para el crecimiento sostenible.

Este nuevo Plan de Acción de 2020 incluye iniciativas a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos, partiendo desde su diseño, y pretende promover la generalización de los procesos de economía circular, logrando con ello fomentar el consumo sostenible y que los recursos utilizados se mantengan en la economía de la UE durante el mayor tiempo posible.

En este nuevo plan, la Comisión Europea define criterios que abarcan los siguientes aspectos:

- Política marco de los productos sostenibles
- Cadenas de valor de productos clave
- Menos residuos, más valor
- Hacer que la circularidad funcione para las personas, las regiones y las ciudades
- Acciones transversales
- Liderar esfuerzos a nivel mundial
- Monitorear el progreso

Cada uno de estos criterios, posee diferentes puntos clave de acción, en el caso que alguna actividad enmarque algunos de estos principios, se puede categorizar como una actividad de Economía Circular. Esto posee diversas ventajas competitivas en caso de llevar a cabo el proyecto, tales como financiamiento, certificaciones de sostenibilidad, marcas de economía circular, etc.

Por otra parte, llevando a cabo estos tipos de proyectos que contribuyan a la Economía Circular, se verán beneficiados en cuanto a nueva legislación que se pondrán en marcha siguiendo este mismo plan de acción.

## 8.2 Economía circular en el proyecto de estudio

En esta sección se analizaron los criterios definidos en el plan de acción de Economía Circular anteriormente descrito y su integración con el proyecto de reciclaje químico de plásticos utilizando técnicas de purificación basada en solventes.

Los aspectos que pudieron observarse relacionados con el proceso son:

Criterios del plan de acción	
Criterio	Ejes
<b>Cadenas de valor de productos clave</b>	Plásticos: - Aumentar la adopción de plásticos reciclados y contribuir a un uso más sostenible de los plásticos. - Normativa sobre la medición del contenido reciclado en los productos. - Reducción para productos clave como envases.
<b>Menos residuos, más valor</b>	- Crear un mercado de la UE que funcione bien para las materias primas secundarias materiales. - Política de residuos en apoyo de la prevención y Circularidad.

Tabla 75 – Criterios del plan de acción de EC alineados con el proyecto

Tal como puede observarse en la tabla, el proyecto en estudio se encuentra alineado con 2 criterios de los que se enmarcan en el plan de acción de Economía Circular. Esto es, además de ser un proyecto que colabora con la circularidad, podría tener beneficios competitivos tales como, anticipación a normativas sobre adopción de plásticos reciclados, medición de contenido reciclado en los productos, políticas futuras en el marco de residuos y circularidad, entre otros.

Para lograr una medición del impacto que generaría esta actividad en términos de Economía Circular se identificaron distintos indicadores y se cuantificaron según los siguientes criterios:

Cuantificación del impacto		
Indicador	Cantidad	Unidad
Plástico reciclado	<b>16.150,98</b>	[toneladas/año]
Disminución de plástico film en vertedero	<b>80,11</b>	%

Tabla 76 - Cuantificación del impacto en el Plan de Acción de Economía Circular

## 9 CONCLUSIONES

---

El objetivo del presente proyecto fue realizar un estudio comparativo de dos diferentes técnicas de reciclaje químico basado en la purificación con solventes para el plástico tipo film abarcando los puntos de vista técnico, económico y financiero.

En primer lugar, se abordó un análisis para observar el material a reciclar en un tipo de plástico envoltorio tipo film, se obtuvo que el mismo estaba compuesto mayoritariamente por LDPE. Con esta información se estudiaron diferentes técnicas para su posible reciclaje y obtener una que sea técnicamente viable, analizando técnicas mecánicas, térmicas y químicas. En este caso particular, la más adecuada fue la técnica del tipo química llamada "Purificación química basada en solventes".

Luego, se realizó una identificación de técnicas que utilizaban diferentes tipos de solventes para llevar a cabo la purificación, estas técnicas se encuentran actualmente a escala laboratorio. De este análisis, se obtuvieron dos alternativas a las cuales se realizó un estudio básico comparativo abordando criterios técnicos y operativos, escalando las condiciones de laboratorio a una producción industrial teniendo en cuenta su posible implementación en una planta de una capacidad de producción conocida, fijada por su caudal de materia prima, en este caso, plástico tipo film a reciclar.

De este primer análisis se concluyó que ambas técnicas eran similares en cuanto a rendimiento, condiciones operativas, dimensiones de la instalación y materias primas e insumos. Si bien, una alternativa poseía un rendimiento ligeramente mayor, se contrarrestaba con condiciones operativas más extremas tales como una mayor temperatura de reacción. Por esto mismo se llevó a cabo un segundo análisis teniendo en cuenta su viabilidad económica y financiera teniendo en cuenta una posible ejecución.

En cuanto a este segundo análisis, se realizó una estimación de los costos fijos y variables del proyecto, obteniendo datos del precio del mercado de nuestro producto final.

Con estos datos, se realizó un flujo de fondos y posteriormente un análisis del TIR y el VAN. Analizando los resultados, se descubrió que ambas alternativas poseían un TIR > al 10% y una VAN positivo. Pero comparando ambas, la alternativa "A" posee un TIR y un VAN superior, por lo que establece a priori, un mejor desempeño en términos económicos y financieros que la alternativa "B".

Los análisis realizados, tanto técnico como económico fueron básicos debido al alcance del presente proyecto. Por esto mismo, se concluye que en el caso de llevar a cabo el proyecto se debería optar por realizar un análisis, ahora riguroso, de la Alternativa "A", para luego decidir si el mismo será de posible implementación en un futuro.

Por último, se realizó un análisis del proyecto teniendo en cuenta los criterios de Economía Circular del plan de acción de la Unión Europea, ya que desde la autoría se consideró importante alinear los objetivos del proyecto con los conceptos de Economía Circular y Sostenibilidad ya que será de vital importancia ya sea para: conseguir financiamiento, certificar normas relacionadas a la sostenibilidad, anticiparse a futuras legislaciones, etc. En este último, se definieron indicadores para lograr una cuantificación del impacto que generaría y se concluyó que realizando la actividad se reciclarían más de 16.000 toneladas anuales de plástico tipo film y se generarían una disminución de un 80% en la disposición de este tipo de plástico en el vertedero.

# REFERENCIAS

---

- [1] Jefatura del Estado, «Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados,» 29 07 2011. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/l/2011/07/28/22/con>. [Último acceso: 28 12 2021].
- [2] T. I. B. a. B. A. Morris, «PE-Based Multilayer Film Structures,» de *Plastic Films in Food Packaging*, 2013 Elsevier Inc, 2009, p. 21.
- [3] A. I. J. D. A. Jenna Meert, «Impact of plastic bag bans on retail return polyethylene film recycling contamination rates and speciation,» *El Sevier*, 2021.
- [4] Polymer Data Base, «Plastics Films,» 2015-2022.
- [5] Zero Waste Europe, «El Dorado of Chemical Recycling,» 2019.
- [6] C. B. C. G. N. N. V. Z. K. M. A. L. D. T. Georgia Pappa, «The selective dissolution/precipitation technique for polymer recycling: a pilot unit application,» *El Sevier*, 2001.
- [7] C. R. P. M. A. L. E. A. D.S. Achilias, «Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP),» *El Sevier*, 2007.
- [8] G. F. N. I. A. Arkan Jasim Hadi, «Polyolefins Waste Materials Reconditioning Using Dissolution/Reprecipitation Method,» *El Sevier*, 2012.
- [9] N. G. A. I. Hadi A.J., «Quality restoration of waste polyolefin plastic material through the dissolution-reprecipitation technique,» *El Sevier*, 2014.
- [10] ECOEMBES, PLANTAS DE SELECCIÓN EELL.
- [11] Food and Agriculture Organization, Secado de granos y secadoras.
- [12] L. M. R. Castillo, RECICLADO DE PLÁSTICO PARA LA AGRICULTURA, 2008.
- [13] R. Chang, Físicoquímica, McGraw -Hill Interamericana de España SL, 2008.
- [14] G. d. España, Gases Licuados del Petróleo (GLP), 2022.
- [15] M. H. H. E. Online, 2022.
- [16] A. R. R. Copyright © 2014 Matches, 2022.
- [17] R. R. Távara, PROPUESTA DE RECICLAJE MECÁNICO DE PLÁSTICOS EN LA CIUDAD DE PIURA, 2004.
- [18] 911 Metallurgist, Especificaciones filtro tambor rotatorio, 2022.

- [19] J. S. P. E. G. P.C., ESTIMACIÓN DE COSTES Y RENTABILIDAD DE EQUIPOS, 1996.
- [20] The plaza group, Actualización del Mercado de Tolueno y Xileno, 2022.
- [21] Alibaba, 1999-2022 Alibaba.com. All rights reserved.
- [22] Vadequímica, 2022.
- [23] Mercado Ibérico de Gas.
- [24] EMASESA, Resumen TARIFAS 2022 CONCEPTOS VARIABLES, 2022.
- [25] Red eléctrica de España.
- [26] Hongjun New Material Technology Co., Wholesale Price Recycled Low Density Polyethylene LDPE, 2022.
- [27] Teshang Technology Co., Ltd., Bottom Price Recycled LDPE Granules Plastic.
- [28] Zhuzun Trading Co., Ltd., Cheaper Price Hot Selling Recycled LDPE / LDPE Granules / LDPE, 2022.
- [29] Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital.
- [30] J. H. a. T. Dlouhý, Indirect Dryers for Biomass Drying—Comparison of Experimental Characteristics for Drum and Rotary Configurations, 2020.
- [31] Letsrecycle.