



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

## Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Estudio técnico mediante caracterización térmica y mecánica de un polímero termoestable de origen bio obtenido a partir de aceite de chía

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Seguí Pons, Mauro

Tutor/a: Fombuena Borrás, Vicent

Cotutor/a: Domínguez Candela, Iván

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

## Resumen

### “Estudio técnico mediante caracterización térmica y mecánica de un polímero termoestable de origen bio obtenido a partir de aceite de chía”

En las últimas décadas, ha habido un gran aumento en la producción y consumo de plásticos de origen fósil a nivel global los cuales están produciendo una gran contaminación en el medio ambiente. Para intentar minimizar dicha situación, actualmente se está observando una elevada tendencia hacia la obtención de materias primas de origen renovable en sustitución de aquellas de origen fósil. Entre las diversas materias primas que se pueden encontrar, los aceites vegetales son una de las opciones más atractivas debido a su alta disponibilidad y elevada reactividad, la cual permite modificarlos químicamente con facilidad, obteniendo una gran variedad de aplicaciones interesantes para la industria. De las diferentes reacciones capaces de modificar los aceites vegetales, en el presente trabajo, se realizará la reacción de epoxidación y de maleinización. Ambas reacciones se emplearán para modificar el aceite de chía. Este aceite fue elegido debido al gran número de ácido grasos insaturados que presenta pudiendo introducir una gran cantidad de grupos epoxy y grupos maleico en los dobles enlaces del aceite. Por ello, el presente trabajo tratará de revalorizar un producto obtenido a partir de aceite de chía (*Salvia hispanica L.*) con el fin de desarrollar un polímero termoestable de origen bio. Finalmente, se realizará el dimensionamiento, diseño, montaje y estudio económico de la planta industrial donde se realizará el proceso de modificación química del aceite para obtener el polímero termoestable, el cual ofrece unas grandes propiedades mecánicas y alta ligereza. Se prevé tener una producción mínima de 50 kg/día y determinar el precio de venta al público del producto para poder recuperar una inversión en torno a los 550.000 €.

**Palabras clave:** semilla de chía; aceite de chía; epoxidación; maleinización; polímero termoestable; biopolímero.

## Summary

**“A technical study by thermic and mechanic characterization about a bio-origin thermostable polymer obtained from chia oil”**

In the last decades, there has globally been a big increase in the production and consumption of fossil origin plastics which are producing a high environmental pollution. In a way of minimizing this situation, it has currently been observed a rising trend towards obtaining raw materials from renewable sources instead of those of fossil origin. From the different raw materials that can be found, vegetal oils are one of the most attractive options due to their high availability and elevated reactivity which allow them to be chemically modified with facility, obtaining a great variety of interesting industrial applications. In the present project, among the different reactions that can modify vegetal oils, the epoxidation and maleinization are the ones which will be carried out. Both reactions will be used to modify the chia oil. This oil was chosen owing to the presence of many unsaturated fatty acids which make possible to introduce a big number of epoxide and maleic groups in the double chemical bonds of the oil. For this reason, this project aims at revalorizing a product obtained from the chia oil (*Salvia hispanica L.*) in order to develop a bio-origin thermostable polymer. Finally, a process of measurement, design, assembly, and economic study will be done in the industrial plant where the oil's chemical modification process will take place to obtain the thermostable polymer which can offer a wide range of mechanical properties and a high lightness. It is expected to have a minimum production of 50 kg/day and to determine the retail price of the product in order to recover an investment of around 550.000 €.

**Keywords:** chia seed; chia oil; epoxidation; maleinization; thermostable polymer; biopolymer.

## Resum

### “Estudi tècnic mitjançant caracterització tèrmica i mecànica d’un polímer termoestable d’origen bio obtingut a partir d’oli de xia”

Durant les últimes dècades, ha hagut un gran augment en la producció i consum de plàstics d’origen fòssil a nivell global els quals estan produint una gran contaminació en el medi ambient. Per tal de minimitzar aquesta situació, actualment s’està observant una elevada tendència cap a l’obtenció de matèries primeres d’origen renovable en substitució d’aquelles d’origen fòssil. D’entre les diverses matèries primeres que es poden trobar, els olis vegetals són una de les opcions més atractives per la seua alta disponibilitat i elevada reactivitat la qual en permet la seua modificació química amb facilitat, obtenint una gran diversitat d’aplicacions interessants per a la indústria. De les diferents reaccions capaces de modificar els olis vegetals, en el present treball, es realitzarà la reacció d’epoxidació i de maleinització. Ambdues reaccions s’empraran per modificar l’oli de xia. Aquest oli fou elegit pel gran nombre d’àcids grassos insaturats que presenta i que pot introduir una gran quantitat de grups epòxid i grups maleic en els dobles enllaços del mateix. Amb aquest motiu, el present treball tractarà de revalorar un producte obtingut a partir de l’oli de xia (*Sàlvia hispanica L.*) amb la finalitat de desenvolupar un polímer termoestable d’origen bio. Finalment, es realitzarà un dimensionament, disseny, muntatge i estudi econòmic de la planta industrial on es durà a terme el procés de modificació química de l’oli per obtenir el polímer termoestable, el qual ofereix unes grans propietats mecàniques i elevada lleugeresa. Es preveu tenir una producció mínima de 50 kg/dia i determinar el preu de venda al públic del producte per a poder recuperar una inversió entorn dels 550.000 €.

**Paraules clau:** llavor de xia; oli de xia; epoxidació; maleinització; polímer termoestable; biopolímer.

# Índice

Resumen.....	1
Summary .....	2
Resum.....	3
Abreviaturas .....	8
Listado de figuras.....	10
Listado de tablas.....	12
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
1.1. Definición y situación actual de los polímeros .....	15
1.2. Clasificación de los polímeros .....	18
1.2.1. Polímeros de base biológica .....	18
1.2.2. Polímeros de origen fósil (no renovables).....	20
1.2.3. Polímeros termoplásticos.....	22
1.2.4. Polímeros termoestables .....	22
1.3. Impacto ambiental de los polímeros .....	24
1.4. Termoestables en ingeniería .....	27
1.4.1. Componentes termoestables .....	27
1.4.1.1. Resinas termoestables.....	27
1.4.1.2. Endurecedor .....	29
1.4.1.3. Otros componentes fundamentales .....	29
1.4.2. Materiales compuestos.....	30
1.5. Aceites vegetales en ingeniería.....	32
1.5.1. Usos y aplicaciones de los aceites vegetales .....	32
1.5.2. Producción y consumo de aceites vegetales .....	33
1.5.3. Estructura aceites vegetales .....	34
1.5.4. Procesos de modificación química .....	35
1.6. Aceite de semilla de chía .....	38

1.6.1. Producción y legislación.....	38
1.6.2. Propiedades fisicoquímicas .....	39
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>41</b>
2.1. Objetivo general.....	42
2.2. Objetivos particulares .....	42
2.3. Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	43
<b>3. DESARROLLO DEL PROYECTO .....</b>	<b>44</b>
3.1. Materiales.....	45
3.2. Equipos .....	47
3.2.1. Extracción del aceite: Extrusora .....	47
3.2.2. Filtrado y centrifugado .....	49
3.2.3. Proceso de epoxidación .....	50
3.2.3.1. Montaje experimental .....	50
3.2.3.2. Metodología empleada.....	51
3.2.3.3. Técnicas de caracterización del aceite .....	52
3.2.4. Proceso de maleinizado .....	54
3.2.4.1. Montaje experimental .....	54
3.2.4.2. Metodología empleada.....	55
3.2.4.3. Técnicas de caracterización del aceite .....	56
3.2.5. Proceso de obtención de probetas .....	56
3.3. Técnicas de caracterización mecánica del polímero .....	58
3.3.1. Ensayo Charpy: prueba de impacto .....	58
3.3.2. Ensayo de dureza .....	59
3.4. Resultados.....	61
3.4.1. Ensayo Charpy: prueba de impacto .....	61
3.4.2. Ensayo de dureza .....	63
3.4.3. Comparativa con resinas termoestables comerciales.....	64

<b>4. ESTUDIO ECONÓMICO .....</b>	<b>66</b>
4.1. Diseño de las instalaciones a escala industrial.....	67
4.1.1. Etapa 1: Obtención de aceite de chía .....	68
4.1.1.1. Diseño centrífuga para la obtención de aceite limpio.....	69
4.1.1.2. Diseño extrusora para obtención de aceite sucio de chía .....	70
4.1.1.3. Diseño silo de almacenamiento de semilla de chía .....	71
4.1.1.4. Diseño tanques almacenamiento residuo sólido y aceite limpio .	72
4.1.2. Etapa 2: Epoxidación del aceite de chía .....	74
4.1.2.1. Diseño tanques almacenamiento reactivos y aceite epoxidado ...	75
4.1.2.2. Diseño del reactor de epoxidación.....	78
4.1.3. Etapa 3: Maleinización aceite de chía .....	81
4.1.3.1. Diseño del silo de almacenamiento de anhídrido maleico.....	82
4.1.3.2. Diseño del reactor de maleinización.....	83
4.1.4. Equipos de envasado.....	86
4.1.5. Equipos globales en todo el proceso.....	87
4.1.5.1. Bombas .....	87
4.1.5.2. Válvulas .....	88
4.1.5.3. Sensores .....	88
4.2. Cronograma del proceso de producción .....	90
4.3. Estudio viabilidad económica .....	93
4.3.1. Presupuesto materiales y reactivos .....	93
4.3.1.1. Volumen de agua para el reactor de epoxidación.....	94
4.3.1.2. Volumen de agua para el reactor de maleinización .....	94
4.3.2. Presupuesto equipos.....	95
4.3.3. Presupuesto planta industrial .....	98
4.3.4. Presupuesto consumo energético .....	99
4.3.5. Presupuesto personal .....	104

4.3.6. Presupuesto total.....	104
4.3.7. Rentabilidad.....	105
4.3.7.1. Parámetros previos para obtener la rentabilidad.....	105
4.3.7.2. Parámetros clave para la obtención de la rentabilidad.....	107
4.3.8. Análisis de los resultados.....	109
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>111</b>
5.1. Conclusiones del trabajo.....	112
<b>6. APÉNDICES .....</b>	<b>114</b>
Apéndice 1. Sistema de control de tanques y reactores .....	115
Apéndice 2. Diagrama de flujo completo del proceso .....	118
6.1. Bibliografía .....	119



## Abreviaturas

CS	Semilla de chía.
CSO	Aceite de semilla de chía.
CSO <sub>S</sub>	Aceite de semilla de chía sucio.
CSO <sub>L</sub>	Aceite de semilla de chía limpio.
LR	Residuo lignocelulósico.
ECSO	Aceite de chía epoxidado.
MSCO	Aceite de chía maleinizado.
AM	Anhídrido maleico.
MNA	Anhidrido metil náutico.
IV	Índice de yodo (I <sub>2</sub> g/ 100 g aceite).
w <sub>AW</sub>	Índice de acidez (mg KOH/g aceite).
O <sub>Oexp</sub>	Oxígeno oxiránico experimental (%).
EEW	Epoxy equivalent weight.
AEW	Anhydride equivalent weight.
DSC	Calorimetría diferencial de barrido.
ρ <sub>CO</sub>	Densidad aceite de chía.
ρ <sub>CS</sub>	Densidad harina de chía.
CP	Capital primario.
DM	Dirección del montaje.
CD	Capital directo.
C	Contratistas.
GNP	Gastos no previstos.
CI	Capital inmovilizado.

CC	Capital circulante.
CF <sub>t</sub>	Flujo neto de caja.
IPC	Índice de precios de consumo (%).
Ø <sub>i</sub>	Diámetro objeto (mm).
V <sub>i</sub>	Volumen objeto (dm <sup>3</sup> ).
LC	Controlador de nivel.
LT	Transmisor de nivel.
FC	Controlador de caudal.
FT	Transmisor de caudal.
FY	Transductor de caudal.
TC	Controlador de temperatura.
TT	Transmisor de temperatura.
TY	Transductor de temperatura.
PT	Transmisor de presión.
PIR	Indicador de presión.
YIC	Indicador controlador PLC.

## Listado de figuras

<b>Figura 1.</b> Producción mundial de materiales plásticos por región en 2019. Adaptado de [1].	16
<b>Figura 2.</b> Producción global de materiales plásticos durante 1950-2020. Adaptado de [7].	17
<b>Figura 3.</b> Clasificación polímeros según su ciclo de vida. Adaptado de [36].	18
<b>Figura 4.</b> Producción global de polímeros biobasados renovables y no renovables. Adaptado de [44].	20
<b>Figura 5.</b> Comparativa en % de la producción de polímeros de origen fósil y biobasados. Adaptado de [38].	21
<b>Figura 6.</b> Estructura termoplásticos y termoestables. Adaptado de [39].	23
<b>Figura 7.</b> Emisiones de GEI (como CO <sub>2</sub> ) para diferentes Petro y biopolímeros. Adaptado de [33].	26
<b>Figura 8.</b> Estructura resinas termoestables más utilizadas. Adaptado de [37].	27
<b>Figura 9.</b> Fase matriz y fase dispersa. Capas de los materiales compuestos. Adaptado de [43].	30
<b>Figura 10.</b> Demanda de materiales compuestos en EE. UU comparándolo en el 2015 y 2021. Adaptado de [40].	31
<b>Figura 11.</b> Consumo mundial de aceites vegetales de 2013/14 a 2020/2021, por tipo de aceite. Adaptado de [41].	33
<b>Figura 12.</b> Estructura general de los triglicéridos. Adaptado de [22].	34
<b>Figura 13.</b> Reacción epoxidación in-situ. Adaptado de [25].	36
<b>Figura 14.</b> Reacciones secundarias de epoxidación. Adaptado de [27].	36
<b>Figura 15.</b> Reacción de maleinización de un aceite vegetal. [27]	37
<b>Figura 16.</b> Comparación producción Chía a nivel mundial en 2013-2014 Adaptada de [30].	38
<b>Figura 17.</b> Partes de la extrusora de prensado en frío.	48
<b>Figura 18.</b> Partes del proceso de filtrado.	49
<b>Figura 19.</b> Máquina centrífuga.	50
<b>Figura 20.</b> Montaje experimental del proceso de epoxidación.	51
<b>Figura 21.</b> Embudo de decantación aceite de chía epoxidado.	52
<b>Figura 22.</b> Montaje experimental maleinización de aceite de chía.	55
<b>Figura 23.</b> Péndulo Charpy.	59

<b>Figura 24.</b> Durómetro Shore D. ....	60
<b>Figura 25.</b> Representación de los datos experimentales de resistencia al impacto (kJ/m <sup>2</sup> ).....	62
<b>Figura 26.</b> Representación de los datos experimentales de dureza Shore D. ....	63
<b>Figura 27.</b> Comparativa muestras experimentales con comerciales.....	64
<b>Figura 28.</b> Diagrama de flujos. Proceso industrial obtención de aceite de chía. 68	
<b>Figura 29.</b> Separadora centrífuga [55]. ....	69
<b>Figura 30.</b> Extrusora obtención CSO <sub>s</sub> [56]. ....	71
<b>Figura 31.</b> Silo almacenamiento CS [57]. ....	72
<b>Figura 32.</b> Tanque LR y CSO <sub>L</sub> [58]. ....	73
<b>Figura 33.</b> Proceso industrial de obtención de aceite de chía epoxidado .....	74
<b>Figura 34.</b> Tanques de reactivos [58] .....	77
<b>Figura 35.</b> RDTA proceso epoxidación [59] .....	80
<b>Figura 36.</b> Proceso de obtención de aceite de chía maleinizado.....	81
<b>Figura 37.</b> Silo almacenamiento AM [67]. ....	83
<b>Figura 38.</b> RDTA proceso maleinización [60]. ....	86
<b>Figura 39.</b> Envasadora [75]. ....	86
<b>Figura 40.</b> Bomba centrífuga [61]. ....	87
<b>Figura 41.</b> Válvula de bola [62]. ....	88
<b>Figura 42.</b> Controlador temperatura [63]. ....	88
<b>Figura 43.</b> Caudalímetro [64]. ....	89
<b>Figura 44.</b> Controlador de nivel [65]. ....	89
<b>Figura 45.</b> Manómetro [66]. ....	89
<b>Figura 46.</b> Diagrama de Gantt del proceso de producción de resina epoxidada y maleinizada a nivel industrial. Adaptado con "Project 2016".....	92
<b>Figura 47.</b> Nave industrial elegida para instalar la planta. Adaptado de [76]. ..	98
<b>Figura 48.</b> Distribución horas y consumo energético de equipos e iluminación. Formato 24 h. ....	103
<b>Figura 49.</b> Esquema sistema de control de los tanques de almacenamiento. ..	116
<b>Figura 50.</b> Esquema sistema de control de los reactores. ....	117
<b>Figura 51.</b> Diagrama de flujos. Proceso productivo de epoxidación y maleinización. ....	118

## Listado de tablas

<b>Tabla 1.</b> Porcentaje de ácido grasos en los principales aceites vegetales. Adaptado de [31].	40
<b>Tabla 2.</b> Datos obtenidos prensado y filtrado de semillas y aceite de chía.	48
<b>Tabla 3.</b> Composiciones endurecedores fabricación termoestable	57
<b>Tabla 4.</b> Datos experimentales, desviación y error del ensayo Charpy.	61
<b>Tabla 5.</b> Datos experimentales, desviación y error del ensayo de dureza.	63
<b>Tabla 6.</b> Características generales separadora centrífuga	69
<b>Tabla 7.</b> Características generales extrusora	71
<b>Tabla 8.</b> Características generales silo de almacenamiento de CS.	72
<b>Tabla 9.</b> Características tanques almacenamiento etapa 1.	73
<b>Tabla 10.</b> Características tanques almacenamiento etapa epoxidación.	77
<b>Tabla 11.</b> Propiedades corrientes entrada y salida reactor de epoxidación.	78
<b>Tabla 12.</b> Características generales RDTA epoxidación.	80
<b>Tabla 13.</b> Características generales silo de almacenamiento AM.	83
<b>Tabla 14.</b> Propiedades corrientes entrada y salida reactor de maleinización.	84
<b>Tabla 15.</b> Características generales RDTA maleinización.	86
<b>Tabla 16.</b> Especificaciones envasadora.	86
<b>Tabla 17.</b> Características generales B-1.	87
<b>Tabla 18.</b> Características generales V-1.	88
<b>Tabla 19.</b> Características TC.	88
<b>Tabla 20.</b> Características FC.	89
<b>Tabla 21.</b> Características LC.	89
<b>Tabla 22.</b> Características PIR.	89
<b>Tabla 23.</b> Tiempo llenado de tanques de almacenamiento.	90
<b>Tabla 24.</b> Tiempo proceso obtención aceite de chía limpio.	91
<b>Tabla 25.</b> Tiempo estimado obtención resina epoxidada y maleinizada.	91
<b>Tabla 26.</b> Cantidades y costes de materiales y reactivos	95
<b>Tabla 27.</b> Costes equipos de almacenamiento	96
<b>Tabla 28.</b> Costes equipos de producción.	97
<b>Tabla 29.</b> Costes equipos auxiliares.	97
<b>Tabla 30.</b> Relación de potencia de los diferentes equipos de la planta.	99
<b>Tabla 31.</b> Potencia diaria equipos	100

<b>Tabla 32.</b> Precios tarifa compañía eléctrica .....	101
<b>Tabla 33.</b> Precios potencia fija contratada. ....	101
<b>Tabla 34.</b> Producción por horas según el periodo de precios. ....	102
<b>Tabla 35.</b> Precios energía consumida .....	103
<b>Tabla 36.</b> Coste anual personal empleado .....	104
<b>Tabla 37.</b> Coste total de inversión. ....	105
<b>Tabla 38.</b> Parámetros para el cálculo del CI .....	106
<b>Tabla 39.</b> Leyenda corrientes y elementos de control. ....	115

# **1. INTRODUCCIÓN**

En primer lugar, en el presente trabajo se definirá el concepto de polímero y se realizará una explicación de forma general sobre la producción mundial y problemática medioambiental actual de los materiales poliméricos. Además, se describirá la clasificación de los polímeros existentes tanto desde el punto de vista estructural como desde el punto de vista de su origen y ciclo de vida. En especial, se centrará en los polímeros termoestables en el ámbito de la ingeniería, de sus características, propiedades, aplicaciones y materiales que pueden formar.

En segundo lugar, se describirán los materiales biobasados, centrándose en los aceites de origen vegetal donde se verán sus características estructurales, su producción a nivel mundial y modificaciones necesarias para poder aplicarse en ingeniería.

Por último, se expondrá y explicará de manera introductoria la materia que se ha utilizado como objeto de estudio en este trabajo que es el aceite de semilla de chía, tanto su definición, producción como sus propiedades fisicoquímicas.

### **1.1. Definición y situación actual de los polímeros**

Los polímeros son moléculas de elevada masa molecular constituidas por unidades que se repiten denominadas monómeros. El término polímero proviene del griego (poly «muchos» y mero «partes») y es sinónimo de macromolécula. Los polímeros se encargan de la isomería de dos sustancias con composición idéntica, donde las diferentes agrupaciones atómicas de los componentes provocan diferentes propiedades entre ellos. Estos polímeros pueden tener un origen muy variado ya que pueden ser naturales, cuando proceden de seres vivos; sintéticos, cuando se preparan por reacciones químicas de polimerización de monómeros; y modificados, cuando provienen de la modificación química de polímeros naturales. [1]

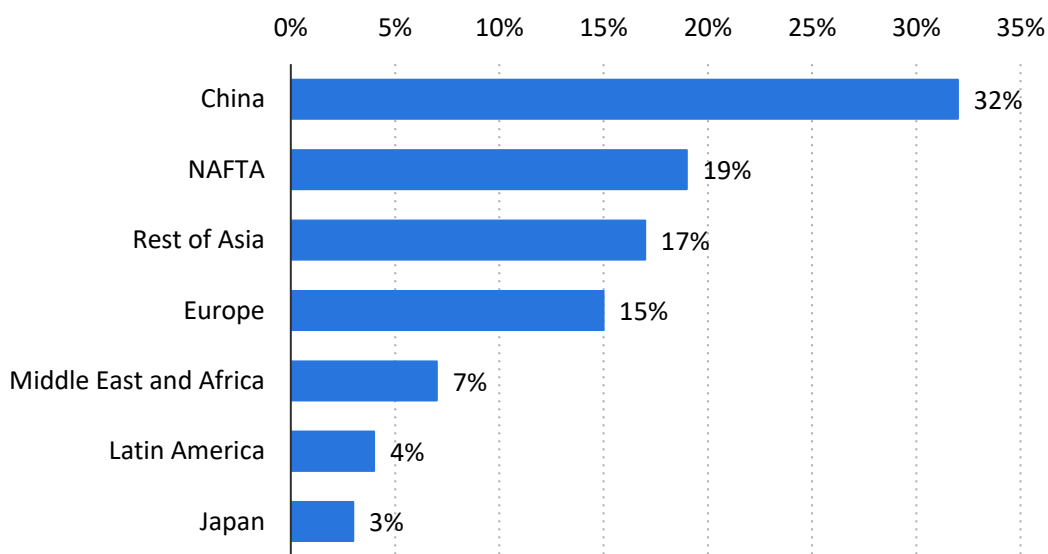
El concepto de plástico se encuentra íntimamente relacionado con el de polímero, y el término también tiene su origen en el griego (plastikos «moldeable»). Así, en el contexto actual un plástico es típicamente un polímero orgánico que además contiene otros componentes de baja masa molecular como, por ejemplo, cargas, refuerzos, pigmentos y colorantes, estabilizantes, antioxidantes, etc. [1]

Desde la segunda guerra mundial, todo tipo de plásticos y fibras han inundado el mundo con el objetivo de satisfacer muchas de las necesidades del ser humano, tanto en



aplicaciones más domésticas y rutinarias (envases, embalajes, calzado, recubrimientos, juguetes, adhesivos, etc.) como en aplicaciones del ámbito ingenieril (engranajes, piezas de bienes de equipo, piezas para el sector de transporte terrestre, naval, etc.) o el ámbito de la alta tecnología (materiales compuestos de diferentes resinas y fibras, prótesis artificiales, trajes ignífugos, chalecos antibalas, etc). Por tanto, debido a este gran impacto, a partir del año 1910, donde se inició la década de producción industrial de Baquelita (primera sustancia plástica totalmente sintética), se ha considerado esta época como la conocida “Edad de los polímeros”.

En la actualidad la producción de polímeros se ha extendido mucho más a lo largo de todo el mundo, en la [Figura 1](#) se muestra la distribución global de la producción de plástico por todas las regiones del mundo en el año 2019. En ésta, se observa cómo la región de China participa en el 31% de la producción mundial de plástico seguido de EE.UU., Canadá y México que juntos forman el tratado de libre comercio de América del Norte (NAFTA) con un 19% y donde se observa que Europa se sitúa debajo del resto de Asia con un 16%. La producción mundial total de plásticos en 2019 ascendió a unos 368 millones de toneladas [1].

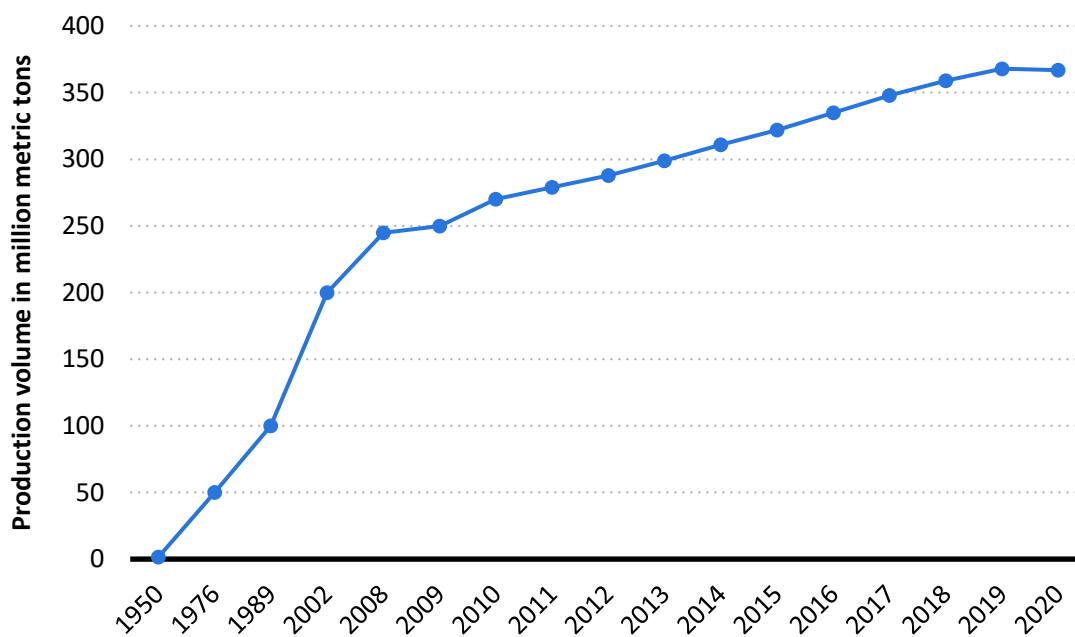


**Figura 1.** Producción mundial de materiales plásticos por región en 2019. Adaptado de [1].

Además, la producción mundial de plásticos disminuyó aproximadamente un 0,3% en el año 2020, tal y como se muestra en la [Figura 2](#), debido al impacto provocado por el COVID-19 en la industria. Como se observa, no disminuyó significativamente debido a la versatilidad de estos materiales plásticos el cual genera un elevado crecimiento año tras año [3].

Cabe destacar que, de los datos proporcionados sobre la producción de polímeros a nivel mundial, la mayoría de estos son de origen petroquímico por lo que provienen de fuentes fósiles.

A estos, se les aplica en su mayoría un modelo de economía lineal, donde se extraen los recursos para fabricar en este caso polímeros, estos se consumen y finalmente se desechan sin que haya un reaprovechamiento o revalorización de residuos generado una problemática medioambiental cada vez mayor y más preocupante [2].



**Figura 2.** Producción global de materiales plásticos durante 1950-2020. Adaptado de [7].

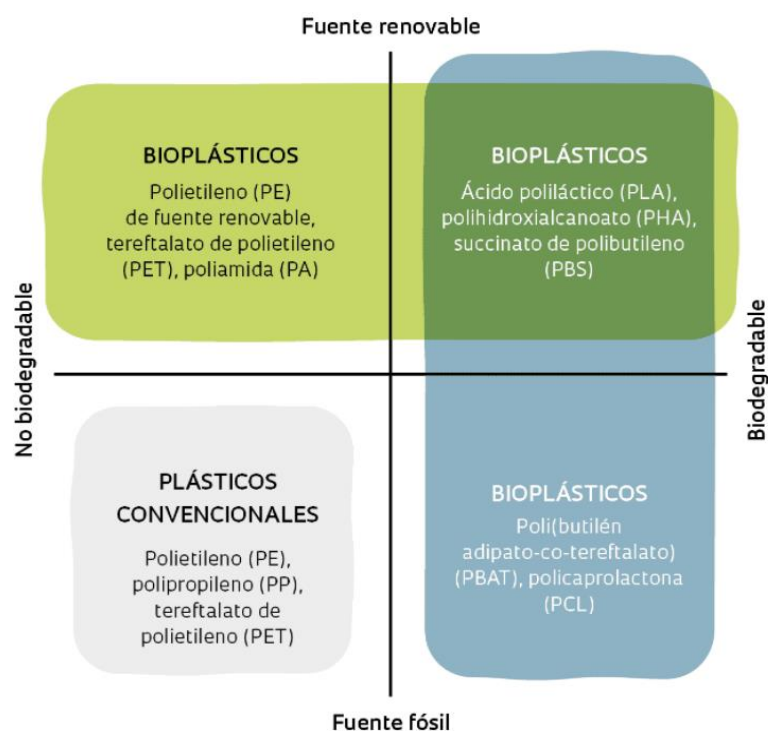
### 1.2. Clasificación de los polímeros

Existen varias maneras de clasificar los polímeros, en este caso, la clasificación se centrará, por un lado, según su origen y fin de ciclo de vida, por otro, según sus propiedades estructurales.

En primer lugar, según su origen y ciclo de vida, se diferenciarán:

- Polímeros de base biológica. Dentro de estos se explicarán tanto los que son biodegradables como los no biodegradables.
- Polímeros de origen fósil. De nuevo se distinguirá entre aquellos que son biodegradables y no biodegradables.

Dicha clasificación se ve reflejada en la [Figura 3](#) donde aparece de forma clara la clasificación de los cuatro tipos diferentes de polímeros según su origen y ciclo de vida.



**Figura 3.** Clasificación polímeros según su ciclo de vida. Adaptado de [36].

#### 1.2.1. Polímeros de base biológica

Los polímeros de base biológica o también conocidos como biobasados, son plásticos derivados generalmente de biomasa tanto total como parcialmente y, por tanto,

proviene de recursos renovables. Los diferentes polímeros de base biológica pertenecen todos al grupo más general llamado bioplásticos los cuales son aquellos polímeros o plásticos biobasados tanto biodegradables, no biodegradables o ambos y cuya producción se ve reflejada en la [Figura 4](#) [3].

### **Polímeros biobasados biodegradables**

Son aquellos que se producen a partir de plantas, animales y microorganismos, o bien pueden ser sintetizados químicamente a partir de materias primas biológicas como la caña de azúcar, maíz o residuos agrícolas entre otros. Esta clase incluye almidón, celulosa, proteínas, lignina, ácido poliláctico (PLA) y polihidroxicanoatos (PHA). Un avance reciente en esta clase de bioplásticos es el desarrollo de tecnología para sintetizar polímeros como polietileno, polipropileno y nailon a partir de recursos biológicos. Como su nombre indica, están diseñados para biodegradarse o descomponerse mediante la actividad biológica, por ejemplo, la acción enzimática. Esto provoca un cambio significativo en la estructura química del material en un medio específico bajo ciertas condiciones y en diferentes periodos de tiempo dando como producto de esta conversión el CO<sub>2</sub>, metano, agua o biomasa [4].

### **Polímeros biobasados no biodegradables**

Estos, al igual que los biodegradables, pueden producirse a partir de recursos como la biomasa o energías renovables. Específicamente, a partir de biomasa lignocelulósica a través de una serie de procesos de conversión como la polimerización, dimerización, oxidación e isomerización entre otros. De esta manera, se obtienen polímeros sintéticos como el biopolietileno (Bio-PE), biopolipropileno (bio-PP), biopolitereftalato de trimetileno (bio-PTT) o el biotereftalato de polietileno (bio-PET). La problemática de estos polímeros es que no tienen esa capacidad de biodegradarse por la acción enzimática bajo ciertas condiciones y periodos de tiempo. Esta falta de degradación provoca una problemática en los ecosistemas al alcanzar su fin de ciclo de vida. Aunque genera un menor problema comparándolo con los polímeros de origen fósil, en cuanto a la producción de éstos. A pesar de ello, son polímeros que tienen unas propiedades idénticas a sus homólogos de origen fósil por lo que se consiguen idénticas propiedades, pero con polímeros formados a partir de fuentes renovables lo cual es un gran paso y una ventaja a tener en cuenta [5].

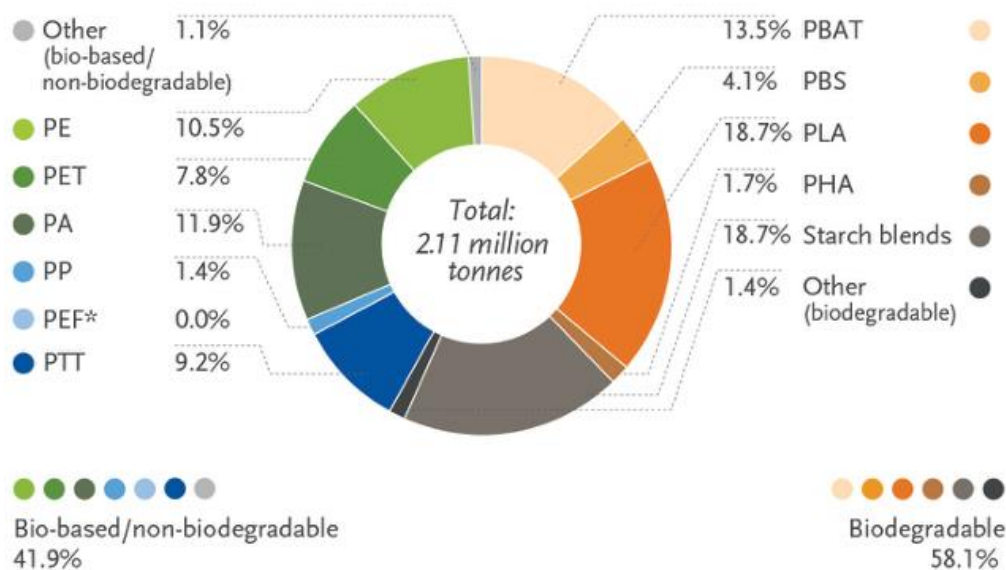


Figura 4. Producción global de polímeros biobasados renovables y no renovables. Adaptado de [44]

### 1.2.2. Polímeros de origen fósil (no renovables)

Los polímeros no renovables son aquellos que se fabrican a partir del procesamiento de combustibles fósiles, es decir, aquellos que vienen de recursos no renovables como el petróleo o el gas natural. La creación y producción de este tipo de plásticos se lleva ejecutando desde hace más de 100 años y su uso ha aumentado de forma gradual llegando a ser insustituible en muchos ámbitos de la actualidad. La producción de estos tipos de plásticos acarrea diversas consecuencias como el agotamiento de los combustibles fósiles debido a las grandes cantidades de plásticos producidos al año (en torno a 368 millones de toneladas [7]). Por otro lado, una gran cantidad de estos plásticos no son reciclados produciendo un incremento del efecto invernadero produciendo así una fuerte contaminación atmosférica [6].

#### Polímeros de origen fósil no biodegradables

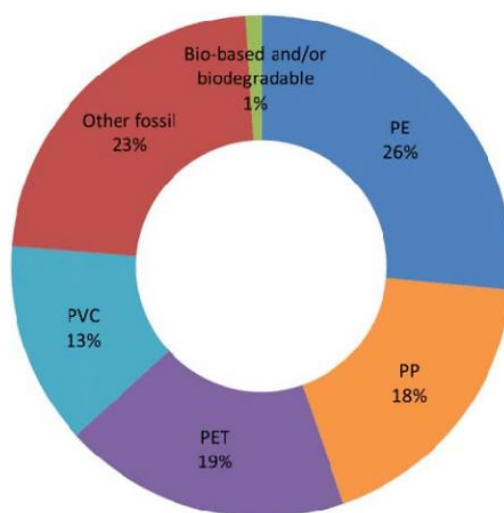
Este tipo de polímeros son lo que se conoce como “polímeros sintéticos”, es decir, los plásticos más utilizados y los primeros que se emplearon. Estos plásticos, debido a su alto índice de contaminación ya que provienen generalmente del petróleo y tienen una descomposición nula en muchos casos, producen un elevado índice de contaminación favoreciendo la pérdida de biodiversidad entre otros factores el cual se está intentando disminuir reduciendo el consumo y producción de este o sustituyéndolo por bioplásticos mucho más respetuosos con el medio ambiente.

De este tipo de polímeros, los más utilizados tanto en uso industrial como cotidiano son los polímeros termoplásticos en los que se destaca en polietileno de alta y baja densidad (HDPE, LDPE), el policloruro de vinilo (PVC), el tereftalato de polietileno (PET), politetrafluoroetileno (PTFE), etc.

### Polímeros de origen fósil biodegradables

Este tipo de polímeros son aquellos que provienen de fuentes no renovables, pero sí que presentan biodegradabilidad. Están dentro del grupo conocido como “plásticos compostables”, es decir, plásticos que se descomponen al final su ciclo de vida, favoreciendo así mayores tasas de reciclaje, aunque, su inconveniente, es que siguen siendo igual de tóxicos que los plásticos convencionales en términos de productos químicos que contienen [8]. Algunos ejemplos de este tipo serían: Polietersulfona (PES), Succinato de polibutileno (PB), Policaprolactona (PCL), Polibutileno de tereftalato adipato (PBAT), entre otros.

En la [Figura 5](#) se observa la producción de polímeros de origen petroquímico en comparación con los polímeros biobasados donde se llega a la conclusión que, a pesar de la cantidad de 2,11 millones de toneladas en base a la producción de polímeros biobasados, ésta solo representa un 1% de la producción total de polímeros donde sigue dominando con una enorme diferencia la producción de polímeros de origen fósil.



**Figura 5.** Comparativa en % de la producción de polímeros de origen fósil y biobasados. Adaptado de [38].

Una vez vistos los distintos tipos de polímeros según su origen y algunos ejemplos, se expondrán los dos tipos principales de polímeros clasificados según su estructura interna y sus propiedades:

- Termoplásticos (estructura lineal).
- Termoestables (estructura ramificada).

### 1.2.3. Polímeros termoplásticos

Los termoplásticos son polímeros que, desde el punto de vista estructural, presentan una estructura generalmente lineal lo que significa que sus enlaces intermoleculares se romperán y se separarán con relativa facilidad con la aplicación de una fuerza externa. Es la familia más usada de polímeros tanto de uso técnico como doméstico consumiendo un 86% de la producción de polímeros. Son polímeros que, al alcanzar su temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) se reblandece y obtiene propiedades muy dúctiles y, al alcanzar su temperatura de fusión ( $T_m$ ), se obtiene el polímero en estado líquido, transformándose así, en sólidos duros vítreos o semicristalinos al enfriarlos debido a que el comportamiento de fusión térmica-solidificación de los termoplásticos es un proceso reversible, aunque limitado [13].

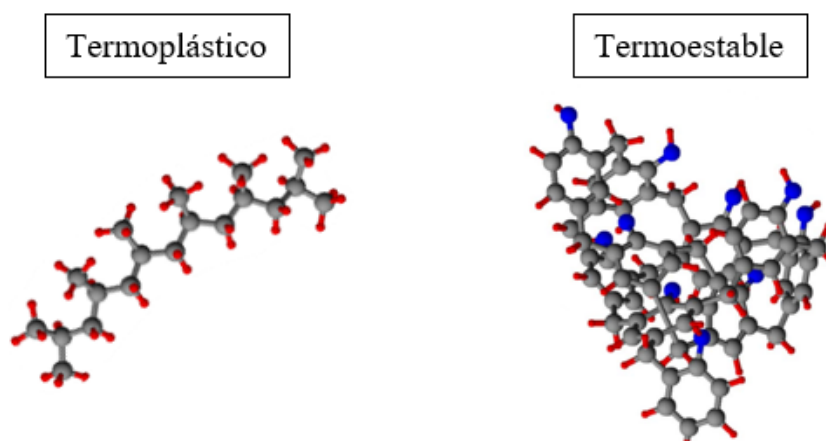
Generalmente son polímeros con una alta movilidad por lo que tienen un fácil procesado y un alto porcentaje de alargamiento (aunque depende del polímero), en cambio tienen unas propiedades mecánicas y resistentes, así como unos valores de  $T_g$  y  $T_m$  bastante bajos en comparación con los termoestables. Algunos ejemplos de termoplásticos son el polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo, plásticos estirénicos, poliamida, policarbonato, etc.

### 1.2.4. Polímeros termoestables

Los polímeros termoestables son aquellos que se obtienen mediante procesos de reticulación de materias en forma de resinas líquidas, es decir, por un tipo de reacción polimérica por policondensación que da lugar a estructuras tridimensionales fuertemente tupidas y entrecruzadas con enlaces intermoleculares covalentes los cuales son muy energéticos. Todas estas características provocan que no haya un deslizamiento nulo de las cadenas poliméricas produciendo así una nula deformación plástica del material, aunque sí que tendrán deformación elástica y altas propiedades mecánicas resistentes lo que produce en contraparte que tengan también una alta fragilidad.

Los termoestables son resistentes y estables a la temperatura ya que no se ablandan ni obtienen un carácter líquido o viscoso al aplicarles un aumento de temperatura. Esto provoca numerosas limitaciones a la hora de conformar y diseñar piezas con este tipo de polímeros ya que no se pueden ablandar ni darles forma como a los termoplásticos. Además, no son reciclables y son más caros que los termoplásticos. A nivel de producción global ocupan un 9% de la producción mundial de plásticos. Algunos ejemplos de termoestables son: resinas de poliéster insaturado, resinas epoxy, aglomerantes, adhesivos estructurales, etc.

En la [Figura 6](#), se muestra una comparación de la estructura tridimensional de los polímeros termoplásticos y termoestables donde se observa claramente la estructura lineal de los polímeros termoplásticos (en concreto polipropileno) y una estructura reticular y mucho más entrecruzada en los termoestables (en concreto fenol-formaldehído). Su estructura es la principal diferencia del porqué tienen características y aplicaciones tan diferentes ambos tipos de polímeros.



**Figura 6.** Estructura polímeros termoplásticos y termoestables. Adaptado de [39].



### 1.3. Impacto ambiental de los polímeros

Una vez vistos los diferentes tipos de polímeros según su origen y ciclo de vida, se observará, a continuación, el impacto ambiental que producen estos materiales y su influencia en el cambio climático. Además, se analizará que tipos de materiales son menos perjudiciales y que técnicas se utilizan para conocerlo.

El consumo excesivo de plásticos, la utilización de recursos, la contaminación y la sobrepoblación son ejemplos de los problemas más básicos para el medio ambiente. Se puede lograr un futuro menos contaminante produciendo productos más sostenibles. Un producto sostenible es aquel que tendrá el menor impacto posible en el medio ambiente durante su ciclo de vida [9].

Para conocer con mayor exactitud el impacto ambiental que provocan los polímeros se realiza la evaluación del ciclo de vida (LCA) que sirve para evaluar los impactos ambientales que se atribuyen al ciclo de vida de un producto, como el cambio climático, agotamiento del ozono estratosférico, la creación de ozono troposférico (smog), la acidificación o el agotamiento de los recursos entre otros [9].

Mediante diversos estudios realizados con diferentes tipos de polímeros, se han obtenidos datos y conclusiones sobre la mejora ambiental que ofrecen los polímeros compostables y de base biológica frente a los polímeros convencionales de origen petroquímico.

Los plásticos formados mediante la utilización de combustibles fósiles emiten gases de efecto invernadero (GEI) en cada etapa del ciclo de la vida del polímero, emitiendo aproximadamente 108 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a nivel mundial. A pesar de estos datos, la producción mundial de plástico sigue creciendo y si no se frena, la polución se podrá duplicar para el 2030-2035 según el CIEL (Centro para el Derecho Ambiental Internacional) [11].

Para evitar que se produzca este nivel de contaminación, se están empezado a utilizar cada vez más los polímeros bio-basados, ya que evitan la extracción y emisión de carbono fósil mediante el uso de materias primas que contengan carbono biogénico presentando potencial para conseguir un cambio a largo plazo y pasar de una economía basada en combustibles fósiles a una basada en biotecnología.

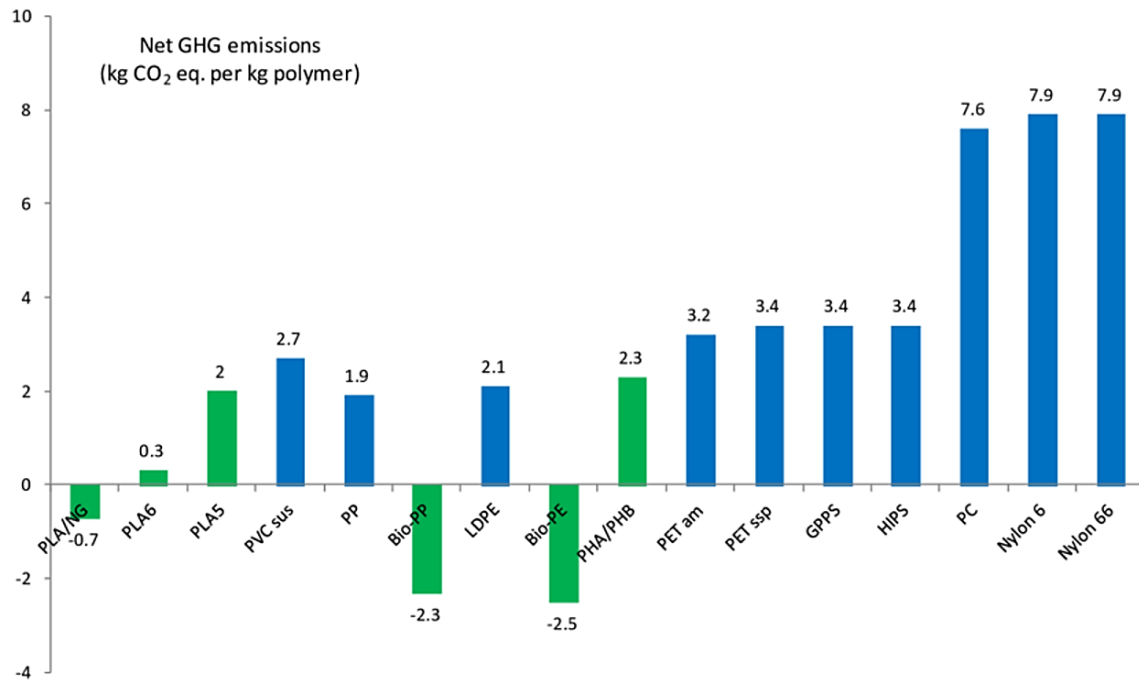
Éstos ofrecen funcionalidades mejoradas con menor emisión de GEI, toxicidad reducida y mejores opciones al final de la vida útil para la disposición final [10].

Si no se mejora la tendencia en la producción y consumo de plásticos de origen fósil, las emisiones del efecto invernadero (GEI) de los plásticos tenderán a alcanzar el 15% del presupuesto mundial de carbono para 2050. Mediante diversos estudios se llegó a la conclusión de que de las 1.78 gigatoneladas (Gt) de CO<sub>2</sub> emitidas en 2015, crecerían hasta las 6.5 Gt de CO<sub>2</sub> en 2050. En cambio, con una concienciación global, una implantación de energía renovables y el reemplazo de la materia prima de origen fósil por biomasa, puede mantener constantes dichas emisiones. Se estima que, con la sustitución del 65.8% de los plásticos convencionales por biobasados, se evitaría entre 241 y 316 megatoneladas (Mt) de CO<sub>2</sub>/año [32].

Dicha sustitución de plásticos no provocaría un cambio o un empeoramiento de la calidad de los productos ya que polímeros biobasados como el bio-PE o bio-PET entre otros, proporcionan características idénticas a las de sus homólogos de origen fósil, además de haber otros polímeros que tienen buenas características dúctiles y resistentes siendo biodegradables (PLA, PHA, TPS...). Asimismo, debido a la gran cantidad de investigaciones y al uso cada vez mayor de este tipo de polímeros se han conseguido grandes avances y aplicaciones reales de estos provocando una disminución cada vez mayor de los precios de estos bioplásticos lo cual permite y facilita el uso de estos para sustituir a los convencionales y numerosos sectores y ámbitos [32].

En la [Figura 7](#) se muestra una estimación “Cradle-to-gate” (de la cuna a la puerta) de las emisiones de GEI asociadas a varios polímeros de origen fósil y biológico en kg de CO<sub>2</sub> emitido por kg de polímero. Se observa que las emisiones son más bajas en los polímeros de origen bio e incluso negativas (que retiran CO<sub>2</sub> de la atmósfera) y las de origen fósil son mucho mayores y por tanto mucho más contaminantes y favorecedoras de los problemas medioambientales [33].

# 1. Introducción



**Figura 7.** Emisiones de GEI (como CO<sub>2</sub>) para diferentes Petro y biopolímeros. Adaptado de [33].

## 1.4. Termoestables en ingeniería

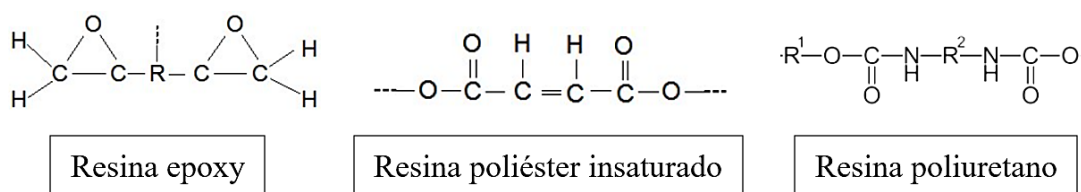
Como se ha visto en la definición de polímeros termoestables, son polímeros que tienen una estructura reticular, es decir, una estructura con cadenas muy entrecruzadas formada por un proceso de polimerización por policondensación. Este es un proceso reactivo de entrecruzamiento donde las cadenas poliméricas reaccionan entre sí y, a la vez, con un agente entrecruzante (calor o una mezcla de calor y presión). Este entrecruzamiento se consigue cuando la funcionalidad de los monómeros es superior a 2 formándose macromoléculas orientadas en todas las direcciones y con numerosos enlaces covalentes entre ellas creando una red tridimensional altamente tupida. El retículo tridimensional confiere al material curado unas propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia química muy elevadas que los hacen aptos para múltiples aplicaciones [14].

### 1.4.1. Componentes termoestables

Los polímeros termoestables, a diferencia de otros tipos de polímeros como los termoplásticos, intervienen diversos componentes ya que no solo es necesaria la resina, sino también un agente denominado endurecedor. Estos endurecedores incluyen aminas, ácidos, anhídridos, fenoles, alcoholes y tioles, son los que permite la reacción de entrecruzamiento de la resina base. Los termoestables son considerados copolímeros de la resina y el endurecedor [15].

#### 1.4.1.1. Resinas termoestables

En las resinas termoestables, sobre todo las epoxy, las de poliéster insaturado y las de poliuretano, son utilizadas en una amplia variedad de aplicaciones en las que actúan como matriz o fase continua de un material compuesto [14]. A parte de esas tres resinas, se encuentran otras como las de polímeros fenólicos, aminas, furanos o siliconas. En la [Figura 8](#) se muestra la estructura de estos tres tipos de resinas más destacadas en los polímeros termoestables. Se expondrán estos tres tipos, pero se profundizará más en las resinas epoxy pues son las empleadas en el presente trabajo.



**Figura 8.** Estructura de resinas termoestables más utilizadas. Adaptado de [37].

### **Resinas epoxy**

Las resinas epoxi son un importante grupo a resaltar puesto que representan el 70% del mercado de resinas termoestables. Su producción se inició a mediados del siglo XX evolucionando con el paso de los años e introduciéndose en mayor número de sectores industriales como los materiales compuestos, pinturas, adhesivos, aplicaciones náuticas, sistemas eléctricos y electrónicos entre otros debido a sus excelentes propiedades mecánicas, eléctricas, resistencia química y mínima contracción después del curado. Pero dichas ventajas están favorecidas tanto por la estructura química de las resinas epoxi como por la correcta elección de los aditivos necesarios (agentes de reticulación, pigmentos, materiales de relleno, plastificantes, catalizadores, etc.). Aunque un inconveniente es su fragilidad debido a la alta densidad de reticulación [35].

Las resinas epoxis a partir de recursos bio presenta ventajas como la ausencia de bisfenol A en su formulación. En las resinas tradicionales el Bisfenol A proviene de recursos fósiles y representa más del 67% de la masa molar de la resina. Además, es perjudicial para el medio ambiente y la salud humana. [35].

### **Resinas de poliésteres insaturados**

Las resinas de poliéster insaturado se obtienen haciendo reaccionar ciertos ácidos orgánicos o anhídridos de ácidos (ácidos di- o poli-carboxílicos) con un grupo de alcoholes denominados polioles (con dos o más grupos hidroxilos por molécula). La reacción que tiene lugar se trata de una esterificación [37].

Estas tienen una carga de rotura entre 41-90 MPa, un bajo porcentaje de alargamiento de 0-3%, un módulo de elasticidad de 2.8-3.4 GPa y una densidad muy baja de 1.25 mg/m<sup>3</sup> [37].

Asimismo, presentan bajas viscosidades, susceptibles de mezclarse con grandes cantidades de materiales de relleno y reforzantes (hasta un 80% de fibra de vidrio). Son usados en la fabricación de paneles de automóvil y prótesis, tuberías, conductos, etc [37].

### **Resinas de Poliuretano**

Las resinas de poliuretano se consideran los polímeros de mayor gama de aplicaciones. Ellos son empleados como principalmente como biomateriales. Se obtienen mediante mecanismos de adición por pasos de un diol de cadena corta o larga y un

diisocianato [34]. Por otro lado, esta tiene una carga de rotura entre 34-68 MPa, un porcentaje de alargamiento de 3-6% y una densidad muy baja de 1.25 mg/m<sup>3</sup> [37].

Los poliuretanos son comercialmente utilizados por su dureza, elasticidad y resistencia a la abrasión. Se utilizan como materiales en construcción, en la fabricación de juguetes, la industria automovilística, en cubierta para cables eléctricos, como ruedas en los elevadores y cinturones de seguridad entre otras. Estos materiales pueden ser una alternativa por su carácter biodegradable en la agricultura y el embalaje [34].

### 1.4.1.2. Endurecedor

Volviendo a los endurecedores cabe decir que, a pesar de las grandes propiedades mecánicas y la alta resistencia a la corrosión que promueven formando una estructura de red reticulada, la mayoría de los agentes de curado de resinas son materiales de base de petróleo y el uso de estos productos aumenta el consumo de recursos no renovables teniendo un impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana [16]. En concreto, uno de los endurecedores de origen petroquímico más empleado, sobre todo en resinas epoxy que son las que se verán con más detalle, es anhídrido de metil nádico (MNA) el cual es una molécula basada en el grupo norborneno y que le va a proporcionar a la resina una elevada rigidez. Posee una masa molecular de 178 g/mol. Otro de los endurecedores que se podría emplear es el anhídrido duodenil succínico (DDSA) el cual posee una molécula más larga y por tanto no proporciona tanta rigidez sino más ductilidad. [18].

### 1.4.1.3. Otros componentes fundamentales

Además de estos dos componentes base, existen otros tipos de componentes que se utilizan en proporciones más bajas pero que tienen un papel fundamental en la formación del polímero termoestable como son;

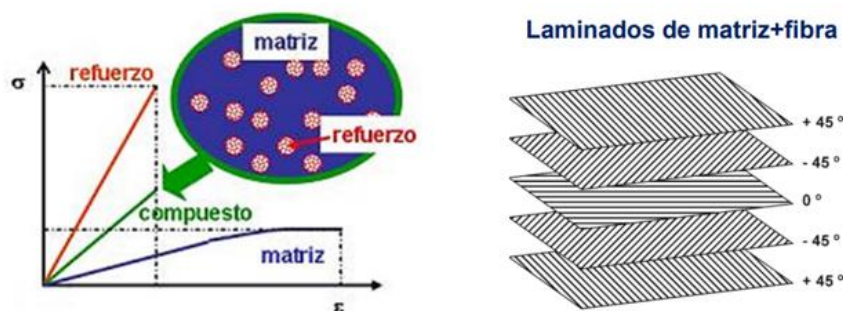
- **Los diluyentes reactivos** los cuales se utilizan para reducir la viscosidad de la resina con el endurecedor y facilitar el procesado.
- **Los iniciadores** que desencadenan esas reacciones de entrecruzamiento.
- **Los aceleradores** que se utiliza para provocar la descomposición química del iniciador a bajas temperaturas. Se suele emplear el 1-metil imidazol.
- **Los catalizadores** los cuales se utilizan para controlar la velocidad de la reacción. De los más utilizados es el glicerol.
- **Los inhibidores** que tienen la función de impedir que se produzcan las reacciones químicas en determinados componentes.

### 1.4.2. Materiales compuestos

Los materiales termoestables, debido a sus grandes propiedades, mecánicas resistentes y su excelente estabilidad a temperatura altas lo hacen un polímero indicado para formar la matriz de lo que se denomina material compuesto [20]. Un material compuesto es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí ya que no son aleaciones. En concreto se combinan materiales de refuerzo (fibras largas con mucha resistencia a esfuerzos de tracción y flexión, gran adaptabilidad a las formas, etc.) y, en este caso, polímeros termoestables que actúan como matriz y que son los que mantienen la forma de las fibras, tienen elevada ligereza, pero no son tan resistentes como las fibras. Se utilizan en sectores donde prevalece la ligereza y la resistencia (aeronáutica, aeroespacial, automóviles de alta competición, etc.).

Se utilizan resinas como fase matriz de estos materiales compuestos ya que tienen elevada ligereza y buenas propiedades adhesivas combinado con un alta tenacidad, excelentes propiedades viscoelásticas y fácil procesado lo que provoca una excelente adhesión a la fibra obteniendo grandes propiedades. Además, protege a las fibras de agentes externos y es la encargada de transmitir la energía de impacto desde la superficie hasta las fibras. En cambio, las fibras son la fase dispersa y consta de fibras largas con una gran resistencia a esfuerzos de tracción y flexión, también contienen alta rigidez mecánica, alta ligereza y adaptabilidad. Estas fibras actúan como elemento resistente ya que es el elemento que soportará los impactos y el esfuerzo mecánico [21].

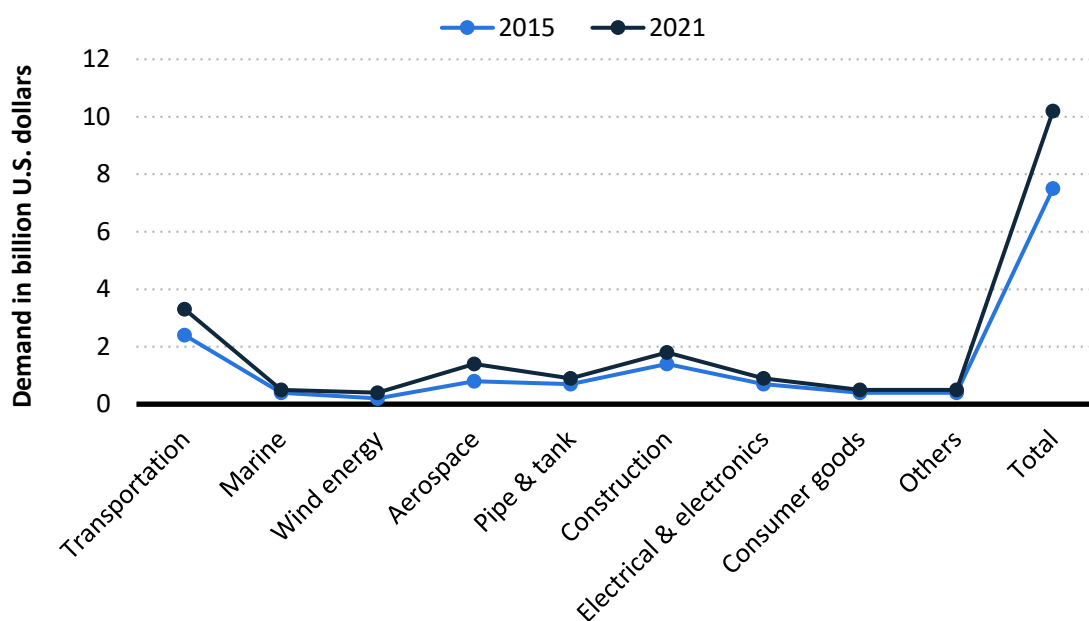
La **Figura 9** muestra cómo se distribuyen ambas fases y las capas de formación de un material compuesto.



**Figura 9.** Fase matriz y fase dispersa. Capas de los materiales compuestos. Adaptado de [43].

En cuanto a la producción y la demanda de estos materiales compuestos cabe decir que, con el paso de los años, cada vez los países invierten más en la producción de estos materiales compuesto y cada vez la demanda sube. Por ejemplo, tal y como se muestra en la [Figura 10](#), el volumen de demanda de materiales compuestos midiéndose en billones de dólares ha crecido en todos los sectores ya que sirven para el sector del transporte, construcción, aeronáutica y aeroespacial entre otros. En concreto se compara el consumo en 2015 y 2021 donde se observa, en total, una creciente demanda de materiales poliméricos aumentando de un total de 800 millones de dólares en Estados Unidos a 1400 millones de dólares lo que supone un gran aumento en la inversión de estos materiales.

Este crecimiento en la producción de resinas para la formación de materiales compuestos está originando que cada vez se busquen y se empleen alternativas bio a las resinas de origen petroquímico utilizando para ello aceites vegetales.



**Figura 10.** Demanda de materiales compuestos en EE. UU comparándolo en el 2015 y 2021. Adaptado de [40].



### 1.5. Aceites vegetales en ingeniería

Los aceites vegetales son excelentes materias primas renovables para la síntesis de una gama de productos, incluidos los polímeros. Derivados de plantas, están compuestos químicamente por diferentes triglicéridos, ésteres de glicerol y ácidos grasos. Estos aceites vegetales son un tipo de materia prima atractiva para muchas aplicaciones industriales, debido a que son recursos renovables, biodegradables, no dañinos para el medio ambiente y presentan alta disponibilidad, pudiéndose producir en grandes cantidades a un costo competitivo. Los factores clave para la aplicabilidad de los aceites son su composición y precio [21].

Los grupos éster y los dobles enlaces son sitios reactivos que están presentes en todos los aceites, esta reactividad permite la modificación química del aceite para mejorar su estabilidad y propiedades a nivel ingenieril. Hoy en día, existe un interés creciente en el uso de plastificantes de base natural debido a su baja toxicidad y migración. Cuanto mayor número de insaturaciones tenga el aceite, mayor cantidad de grupos epoxy se podrán tener y mejores propiedades tendrán este tipo de resinas [21].

#### 1.5.1. Usos y aplicaciones de los aceites vegetales

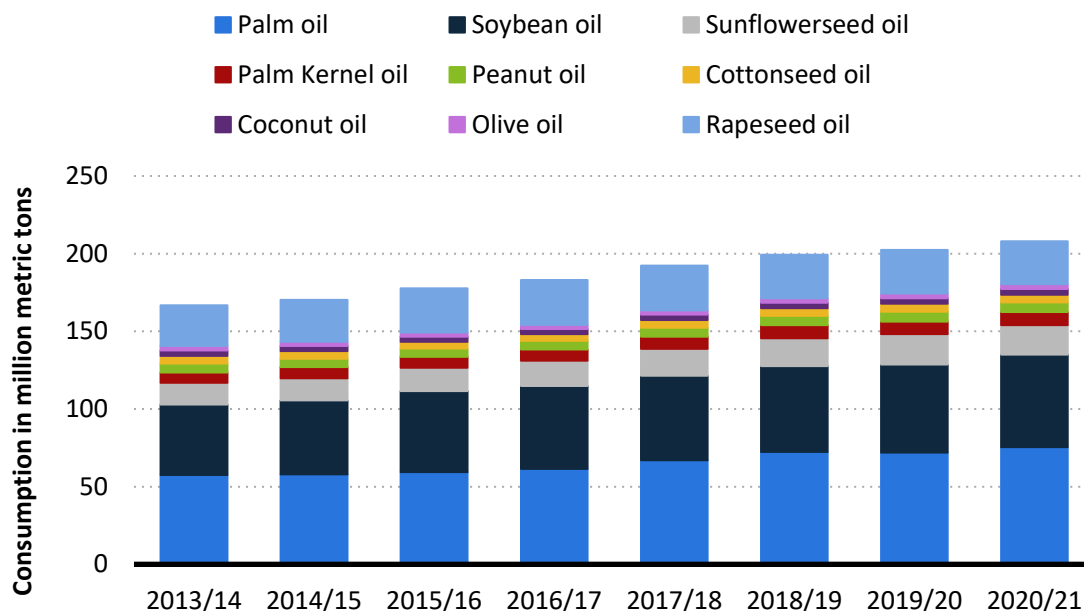
Los aceites vegetales insaturados se han utilizado durante muchos años en la elaboración de materiales poliméricos. En los últimos diez años se han realizado cada vez más estudios con el objetivo de convertir la biomasa en compuestos químicos. Pero esto sigue siendo hoy un gran desafío ya que la compatibilidad entre el plastificante y el polímero es de crucial importancia para una plastificación efectiva. Se pueden usar varios parámetros para predecir la compatibilidad, incluidos la polaridad, los enlaces de hidrógeno, la constante dieléctrica y los parámetros de solubilidad [21].

Éstos, aunque mayoritariamente se utilicen como bioplastificantes para polímeros y biopolímeros sustituyendo así a moléculas tóxicas como los ftalatos, también se pueden encontrar como material polimérico termoestable en forma de resinas como las epoxy las cuales pueden formar parte de los materiales compuestos nombrados anteriormente [35]. Asimismo, los aceites tienen muchas otras aplicaciones ya que se utilizan para la fabricación de pinturas, esmaltes o colas (aceite Dammar), para la elaboración de biodiésel como consecuencia de la tendencia cada vez mayor de sustituir los combustibles fósiles convencionales (aceite de colza o de soja, incluso aceite de palma o cáñamo).

Incluso se utilizan en la industria eléctrica debido a su compatibilidad medioambiental y su biodegradabilidad a diferencia de los aceites minerales (aceite de ricino) [41].

### 1.5.2. Producción y consumo de aceites vegetales

La producción y el consumo de aceites vegetales ha ido incrementando de forma considerable durante los últimos 10 años. En la [Figura 11](#) se observa como el consumo total en el año 2013-2014 era de 166.76 millones de toneladas y en el año 2021/2022, la producción aumentó más de un 20% hasta llegar a los 210.51 millones de toneladas. Estos datos son debidos a que el 90% de aceite se utiliza para el consumo alimentario mientras que el 10% restante se utiliza en el sector industrial como productos cosméticos, elaborando polímeros y biopolímeros o en combustible. Es por ello por lo que tanto la producción como el consumo hayan sufrido este aumento tan elevado en los últimos años.

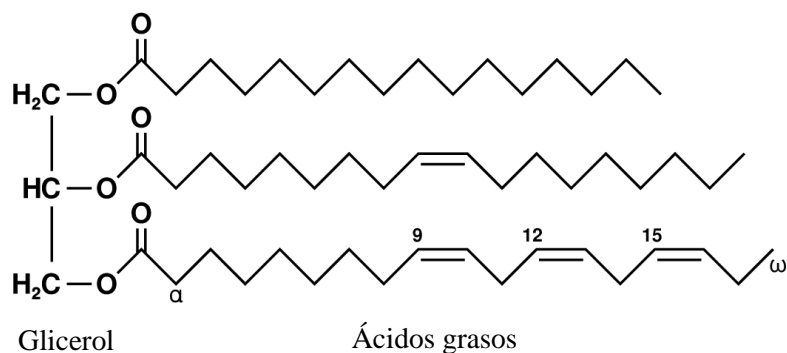


**Figura 11.** Consumo mundial de aceites vegetales de 2013/14 a 2020/2021, por tipo de aceite. Adaptado de [41].

Además del consumo humano y el consumo industrial, los aceites vegetales ofrecen muchas otras ventajas como es su renovabilidad. Su disponibilidad en todo el mundo y sus precios relativamente bajos los hacen atractivos y factibles. Otro punto positivo es que se les puede aplicar una química diversa, lo que da lugar a una gran variedad de monómeros y polímeros empleados en muchas aplicaciones distintas [22].

### 1.5.3. Estructura aceites vegetales

Los principales constituyentes de los aceites vegetales son los triglicéridos, éstos surgen de la esterificación del glicerol junto a tres ácidos grasos unidos mediante enlaces éster tal y como se muestra en la [Figura 12](#). Los ácidos grasos representan el 95% del peso total de los triglicéridos y su contenido es característico para cada aceite vegetal [22].



**Figura 12.** Estructura general de los triglicéridos. Adaptado de [22].

Los ácidos grasos pueden calificarse según el tipo de enlace carbono-carbono que presente su estructura:

- Saturados: Estos ácidos presentan la fórmula general R-COOH. Son aquellos que no presentan ningún doble enlace en toda la cadena.
- Insaturados: Dentro de este grupo encontramos dos subgrupos:
  - Monoinsaturados: Son los que presentan solamente un doble enlace C=C en toda su cadena lineal, este doble enlace se conoce como insaturación.
  - Poliinsaturados: Son los que presentan más de una insaturación, es decir, más de un doble enlace. Generalmente entre 2 y 3.

La longitud de la cadena de los ácidos grasos suele estar en el rango de C12-C24. Los tres ácidos grasos varían entre las materias primas y juegan un papel importante en la determinación de las propiedades del aceite. Las dos variables principales entre los ácidos grasos son el número de dobles enlaces y la longitud de la cadena.

En general, una longitud de cadena más larga da como resultado un punto de fusión y una viscosidad más altos, y más enlaces dobles corresponden a puntos de fusión más bajos, menor viscosidad y estabilidad termooxidativa [24].

Por lo general, los ácidos grasos de cadena larga se oxidan más lentamente y los ácidos grasos insaturados se oxidan más rápidamente que los saturados. La oxidación de los saturados disminuye al aumentar la longitud de la cadena de carbono [23].

### 1.5.4. Procesos de modificación química

Como la mayoría de los aceites vegetales contienen una o varias insaturaciones en su cadena (dobles enlaces C=C), estas insaturaciones provocan que los aceites vegetales tengan un bajo rendimiento a bajas temperaturas, además de tener una baja estabilidad térmica y oxidativa. Para solventar este problema, es necesario realizar una serie de modificaciones químicas sobre los aceites más reactivos (los que contengan más insaturaciones) lo cual mejorará sus características y propiedades mecánicas resistentes. [24]. Los métodos más empleados son el método de epoxidación, maleinización, acrilación e hidroxilación. No obstante, en el presente trabajo se expondrán los métodos de epoxidación y maleinización debido a que serán los dos con los que se ha trabajado.

#### **Epoxidación**

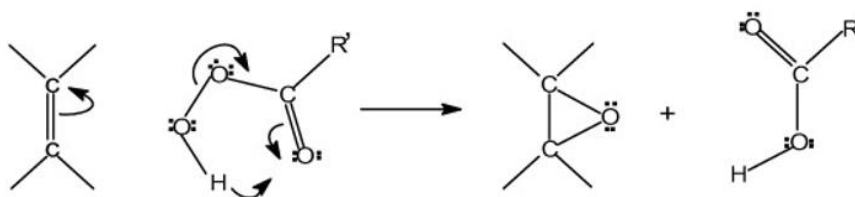
La epoxidación implica la eliminación de dobles enlaces entre dos carbonos a través de la introducción de oxígenos oxiránicos, lo que da como resultado un grupo funcional epoxi (anillo que contiene dos átomos de carbono y uno de oxígeno). En este caso, la reacción introducirá un ácido carboxílico que reaccionará con peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ). El oxidante que se utiliza en todos los tipos de reacciones de epoxidación es el denominado como perácido (ácido peróxido), éste se obtiene cuando un ácido carboxílico (normalmente ácido acético) reacciona con peróxido de hidrógeno en presencia de ácidos minerales que actúan como catalizadores. Existen diferentes tipos de métodos para este proceso, aunque la única diferencia es el uso de los catalizadores. La utilización de diferentes catalizadores es debido a problemas que pueden aparecer como que la manipulación de  $H_2O_2$  altamente concentrado junto a ácidos fuertes puede ser peligrosa llegando a provocar problemas corrosión. Por ello, estudios recientes, Campanella et al. demostró que la incorporación de titanio (Ti) sobre un soporte de sílice amorfa (Ej:  $Ti/SiO_2$ ) produce catalizadores de oxidación altamente eficaces en las reacciones de epoxidación con peróxido de hidrógeno [25].

## 1. Introducción

En cuanto al mecanismo de reacción, se observa en la [reacción 1](#) la epoxidación in situ (en un solo paso) de aceite vegetal a partir de la reacción de ácido carboxílico con peróxido de hidrógeno para la formación de ácido peróxido en lo que se considera como reacción catalizada por ácido.

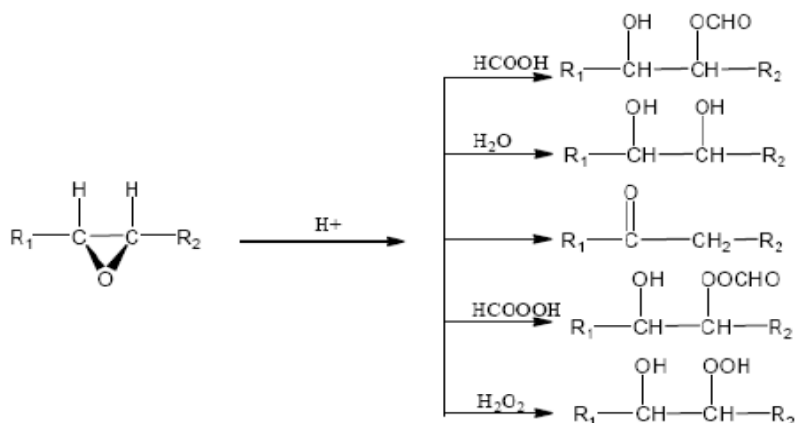


Mientras que la reacción principal que involucra la formación del grupo epoxy es una reacción no catalizada tal y como se muestra en la [Figura 13](#).



**Figura 13.** Reacción epoxidación in-situ. Adaptado de [25].

Es necesario comentar que existen diferentes tipos de reacciones secundarias, las cuales se basan en la división de los anillos epoxy que pueden tener lugar utilizando un catalizador ácido. Estas reacciones secundarias aparecerán en mayor o menor medida dependiendo de la importancia que tengan variables como la temperatura, la cantidad de catalizador, la agitación o la cantidad de peróxido en el resultado final del proceso. En la [Figura 14](#) se muestran dichas reacciones.



**Figura 14.** Reacciones secundarias de epoxidación. Adaptado de [27].

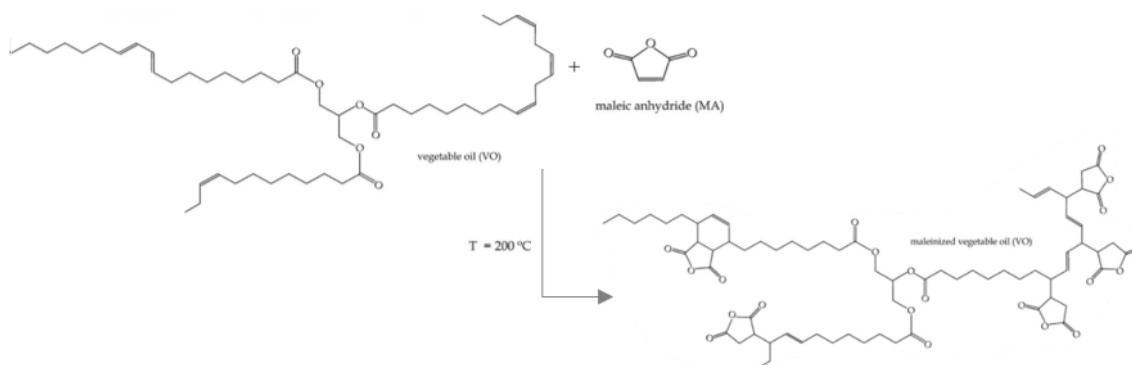
Una vez visto las reacciones de epoxidación, se va a ver también las aplicaciones que pueden tener estos aceites vegetales a la hora de formar polímeros ya que la resina de este proyecto está formada a partir de la epoxidación de un aceite vegetal (que actúa como resina epoxy), de ahí que se le esté dando mayor hincapié a este método.

Los aceites vegetales epoxidados ofrecen materiales renovables prometedores y económicos para muchas aplicaciones industriales porque comparten muchas de las características de los termoestables epoxy convencionales a base de petróleo.

Los ácidos grasos epoxidados de aceites como los de linaza y soja, reaccionan lentamente con los agentes de curado nucleofílicos. Es por ello que, los aceites vegetales epoxidados se utilizan como plastificantes, agentes endurecedores, y estabilizantes en termoplásticos. Además, debido a las buenas propiedades y resistencia térmica y química se pueden utilizar en sectores como la aeronáutica, biomedicina en aplicaciones como el recubrimiento de suelos industriales o principalmente como matriz en compuestos como puede ser la fibra de carbono para formar los materiales compuestos [26].

### Maleinizado

El proceso de maleinizado es un aquel que se realiza en una única etapa. Este proceso termoquímico consta en la unión química de ácido maleico a un triglicérido por lo que denominan reacciones ‘eno’ o también por condensación de Diels-Alder (en el caso de insaturaciones conjugadas en un ácido graso). La reacción ocurre aproximadamente a 200°C tal y como se ve en la [Figura 15](#). Los aceites vegetales que han sido maleinizados se utilizan en el sector cosmético, en detergentes o productos de limpieza, lubricantes y recubrimientos entre otras aplicaciones [27]. Con este proceso, se consigue que una resina actúe como endurecedor y que sea completamente de origen bio.



**Figura 15.** Reacción de maleinización de un aceite vegetal. [27]

## 1.6. Aceite de semilla de chía

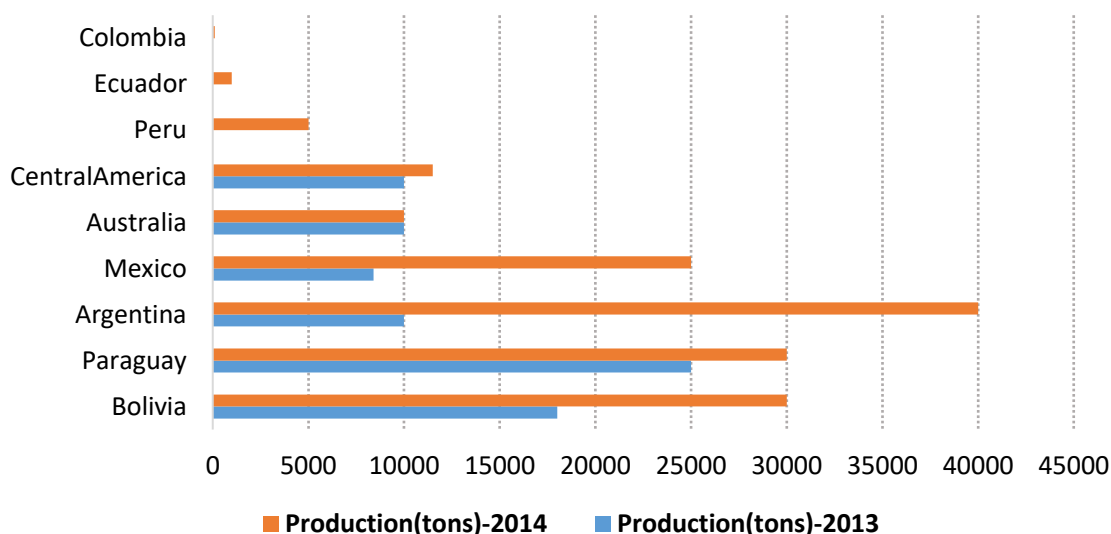
La *Salvia hispanica L.*, comúnmente conocida como chía, es un alimento milenario el cual aporta una cantidad equilibrada de diferentes tipos de nutrientes compuestos por fibras insolubles, altos ácidos grasos  $\omega$ -3/-6, además de proteínas con una buena calidad de aminoácidos, alto contenido en antioxidantes, y minerales.

La chía es nativa del centro de México hasta el norte de Guatemala y comenzó a usarse en la alimentación humana alrededor del 3500 a. C.

### 1.6.1. Producción y legislación

La producción comercial de chía solo se concentró en áreas específicas como Bolivia y Paraguay. Como se muestra en la [Figura 16](#), ya en el año 2014 excepto Australia, todos los demás países aumentaron en mayor o menor cantidad su producción destacando el gran aumento de producción de chía en Argentina en tan solo un año pasando de las 10.000 t en 2013 a las 40.000 t en 2014.

Este aumento de la producción global de chía se deba a las buenas características que ofrece como su composición química, su contenido en aceite y su composición de ácidos grasos con una elevada proporción en ácidos grasos muy insaturados lo cual proporciona una gran cantidad de puntos reactivos que aplicando los métodos de epoxidación o maleinizado permite obtener un aceite con unas propiedades muy interesantes a nivel industrial e ingenieril, de ahí el aumento de su producción [30].



**Figura 16.** Comparación producción Chía a nivel mundial en 2013-2014 Adaptada de [30].

En cuanto a legislación, la chía es considerada a nivel internacional por la FDA (Food and Drug Administration) como un alimento. Además, en 2013 se autorizó el uso de semillas de chía como ingrediente alimentario y en 2014 empezó su comercialización.

### 1.6.2. Propiedades fisicoquímicas

El aceite de chía presenta una serie de propiedades las cuales le permiten ser un componente a tener en cuenta a nivel ingenieril para la utilización de éste en la fabricación de diferentes tipos de polímeros como los termoestables.

En primer lugar, la composición de la semilla de chía contiene alrededor de un 33% de aceite. Por otro lado, en cuanto a los ácidos grasos que posee, cuenta con aproximadamente un 60% de ácido linolénico, un 20% de ácido linoleico, porcentajes rondando el 6,5% de ácido palmítico y oleico, y ácido esteárico con un porcentaje menor al 4% [32]. En la [Tabla 1](#) se muestran los valores exactos de los porcentajes del aceite de chía comparándolos con otros aceites de gran importancia a nivel ingenieril [31].

Es importante resaltar que la composición de chía es variable dependiendo de la región donde crece. Las mejores regiones para su crecimiento son regiones tropicales, subtropicales e incluso climas templados. Mediante diferentes estudios, se ha obtenido que la semilla de chía contiene aproximadamente 5.8% de humedad, 16.54% de proteínas, 30.74% de lípidos en su totalidad, 34.40% de fibra dietética total (TDF), 42.12% de carbohidratos totales y alto contenido de calcio, fósforo, potasio y magnesio (335-860 mg/100 g) y en menor proporción sodio, hierro y zinc (4.58 a 16 mg/100 g). Además, la semilla de chía es una buena fuente de niacina y vitaminas A y C [32].

En cuanto al índice de yodo, este se define como a cantidad de halógenos, expresada en forma de yodo (mg) absorbida por los dobles enlaces presentes por cada 100 g de aceite, es decir,  $I_2 \text{ g} / 100 \text{ g}$  aceite y es un indicador clave del grado de insaturación de los aceites. En los aceites saturados, el valor es de 0 ya que no presentan dobles enlaces en sus cadenas [34]. En el caso del aceite de chía, es uno de los aceites con mayor cantidad de insaturaciones sino la que más, esto es debido a que, como muestra en la [Tabla 1](#), tiene un elevado porcentaje de ácidos poliinsaturados (linoleico y linolénico) seguido del aceite de linaza o el de palma que contienen también elevados porcentajes de ácido linoleico y linolénico.



## 1. Introducción

---

En la [Tabla 1](#), se muestran los diferentes valores de índice de yodo de los anteriores aceites nombrados donde se observa que la chía tiene el mayor índice de yodo y por lo tanto es el aceite con una mayor refracción y densidad.

**Tabla 1.** Porcentaje de ácido grasos en los principales aceites vegetales. Adaptado de [31].

<b>Ácidos grasos más relevantes (%)</b>						
<b>Aceites</b>	<b>Palmítico</b>	<b>Linoleico</b>	<b>Linolénico</b>	<b>Oleico</b>	<b>Esteárico</b>	<b>Índice de yodo (IV)</b>
Chía	7.40	18.70	63.60	7.40	2.69	206.8
Linaza	5.18	16.12	54.59	19.04	3.26	171.9
Soja	11.50	53.33	6.76	23.50	4.11	128.2
Ricino	1.36	4.82	0.56	3.37	1.11	85.3
Palma	42.31	10.07	0.28	40.90	4.27	43.2
Oliva	11.26	9.82	5.51	74.52	2.79	8.2

El aceite de chía, al tener el mayor valor de IV, lo convierte en un aceite muy prometedor para que tenga una gran cantidad de enlaces reactivos una vez producida las modificaciones químicas (epoxidación y maleinización en el presente trabajo). Además, esto puede suponer mejores propiedades respecto a otros aceites, lo que lo convierte en uno de los aceites más atractivos para ser modificado a nivel ingenieril. Por tanto, el aceite de chía modificado podría emplearse como materia prima para ser aplicada en el campo de los polímeros. En ese caso concreto, se utilizará como resina de origen biobasado debido al aumento de producción de los materiales compuestos a nivel mundial.

## **2. OBJETIVO**

### 2.1. Objetivo general

El objetivo general del presente proyecto es la de producir una cantidad mínima de 50 kg/h de una resina epoxy y un endurecedor de origen bio, empleando para ello un aceite de chía modificado químicamente que, en combinación con un endurecedor de origen petroquímico y un catalizador, permita desarrollar un nuevo polímero termoestable con un alto contenido bio, el cual genere un gran interés industrial.

### 2.2. Objetivos particulares

Para poder alcanzar el objetivo general se deben llevar a cabo una serie de objetivos secundarios:

- Extracción del aceite de chía.
- Cálculo del rendimiento de la extracción.
- Caracterización del polímero termoestable obtenido experimentalmente.
- Comparación polímero obtenido con otros de origen petroquímico.
- Dimensionamiento de equipos necesarios para el proceso.
- Desarrollo industrial.
- Estudio económico.

### 2.3. Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En cuanto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el actual proyecto trabaja los siguientes objetivos:

- **Objetivo 9:** Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.  
Tal y como se describe en el propio objetivo, el actual proyecto promueve una industrialización inclusiva y sostenible, los cuales, junto con la innovación y la infraestructura, pueden dar rienda suelta a las fuerzas económicas dinámicas y competitivas que generan el empleo y los ingresos. Estas desempeñan un papel clave a la hora de introducir y promover nuevas tecnologías, facilitar el comercio internacional y permitir el uso eficiente de los recursos.
- **Objetivo 12:** Producción y Consumo Responsables, ya que el consumo y la producción mundial (fuerzas impulsoras de la economía mundial) dependen del uso del medio ambiente natural y de los recursos de una manera que continúa teniendo efectos destructivos sobre el planeta. El progreso económico y social conseguido durante el último siglo ha estado acompañado de una degradación medioambiental que está poniendo en peligro los mismos sistemas de los que depende nuestro desarrollo futuro (y ciertamente, nuestra supervivencia).

# **3. DESARROLLO DEL PROYECTO**

En el presente trabajo, se van a exponer los pasos realizados para obtener un proceso de epoxidación del aceite de chía de manera óptima y que será utilizado como resina epoxy para polímeros termoestables. Por tanto, se detallarán los materiales y reactivos utilizados para dicho proceso, así como el proceso seguido y equipos utilizados para llevar a cabo todo el proceso, desde la extracción del aceite de chía hasta su epoxidación.

Asimismo, se explicará el proceso de maleinizado del aceite de chía para la obtención de una resina que actuará como endurecedor bio en sustitución de aquellos de origen petroquímico, todo ello junto a los equipos utilizados, materiales y reactivos.

Finalmente, se explicarán las técnicas de caracterización realizadas a los diferentes tipos de polímeros termoestables, con sus diferentes porcentajes de endurecedor petroquímico y renovable, para su comparación y evaluación frente a productos de origen petroquímico, con el fin de conocer si los nuevos materiales de origen bio pueden ser una propuesta atractiva para poder emplearlos en sectores donde se utilizan polímeros termoestables.

#### **3.1. Materiales**

La semilla de chía, la cual es objeto de estudio, se adquirió del proveedor “FrutoSeco”. Se obtuvo la cantidad necesaria para la realización del proceso de epoxidación y maleinizado. Además, se aseguró que la semilla de chía provenía toda del mismo origen, Uruguay.

Los reactivos utilizados en el proceso de epoxidación son:

- Ácido acético glacial (N° CAS: 64-19-7), 99,7% wt.
- Peróxido de hidrógeno (N° CAS: 7722-84-1), 30% wt.
- Ácido sulfúrico (N° CAS: 7664-39-9), 95-97% wt.

Los reactivos utilizados en el proceso de maleinización son:

- Anhídrido maleico (N° CAS: 110-16-7), 99,5% wt.

Los reactivos del proceso de formación del polímero termoestable son:

- 1-metil imidazol (N° CAS: 616-47-7), 99% wt.
- Anhídrido metil nádic (MNA, N° CAS: 25134-21-8), 99% wt.
- Aceite de semilla de chía maleinizado (MCSO).
- Aceite de semilla de chía epoxidado (ECSO).

## 3.2. Equipos

En este apartado se detallarán los equipos utilizados en el proceso de extracción del aceite, epoxidación, maleinizado, elaboración de probetas termoestables y caracterización de las mismas. Se detallará la metodología empleada y las condiciones de trabajo empleadas.

### 3.2.1. Extracción del aceite: Extrusora

El primer paso experimental es la obtención o extracción del aceite partiendo de la semilla de chía. Según diversos estudios, se pueden emplear diferentes métodos para realizar este proceso como son el de prensado en frío o caliente [45], extracción con disolvente (método Soxhlet) investigado por Ixtaina et al. [46] o empleando fluidos supercríticos [47].

Entre los métodos se empleó el de extracción mecánica de prensado en frío, ya que es un método respetuoso con el medio ambiente y no se utiliza ningún tipo de disolvente, además de que es el método más económico de los ya descritos. El hecho de llevarse a cabo en frío (temperatura ambiente) evita modificar las propiedades de los ácidos grasos insaturados como pasaría al realizarlo en caliente. Por otra parte, si lo realizásemos por extracción mediante disolvente no tendríamos un bajo impacto medioambiental además de generar un alto coste [35].

Para el prensado o extracción del aceite se utiliza una extrusora cuyo modelo es el “DL-ZYJ05” suministrada por “Nanchang Dulong Industrial Co. Ltd” representada en la [Figura 17](#).

Una vez extraído el aceite y el residuo sólido lignocelulósico, este último se introduce de nuevo en la tolva de alimentación de la extrusora para obtener la máxima cantidad de aceite y conseguir el máximo rendimiento y el mínimo porcentaje de pérdidas.





**Figura 17.** Partes de la extrusora de prensado en frío.

En la [Tabla 2](#) se muestran las cantidades iniciales de semilla de chía, el aceite y residuo obtenido en la primera y la segunda pasada por la extrusora, así como el rendimiento obtenido al final de dicha operación.

**Tabla 2.** Datos obtenidos prensado y filtrado de semillas y aceite de chía

Masa de semillas de chía	3725
<b>Primer prensado</b>	
Aceite obtenido (g)	918
Residuo lignocelulósico (g)	2725
<b>Segundo prensado</b>	
Aceite obtenido (g)	1087
Residuo lignocelulósico (g)	2515
<b>Filtrado</b>	
Aceite filtrado (g)	911
Rendimiento total (%)	24,46

### 3. Desarrollo del proyecto

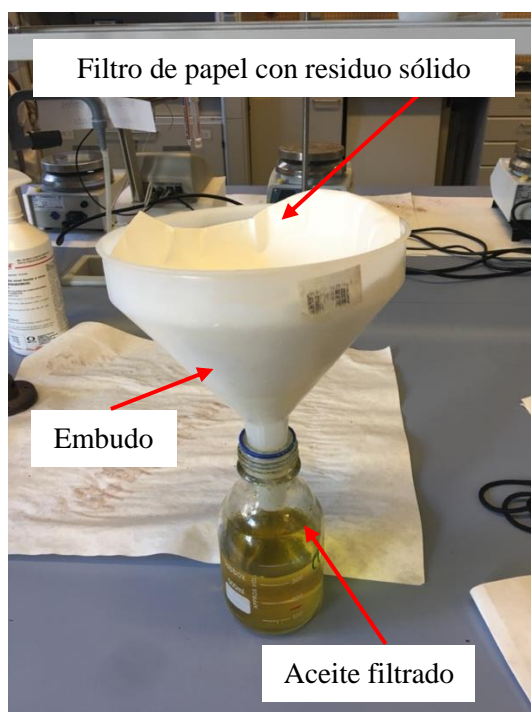
---

El rendimiento se calcula siguiendo la [ecuación 2](#), teniendo en cuenta la cantidad de aceite obtenida tras el filtrado y la cantidad de semillas que había inicialmente.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{masa aceite filtrado (g)}}{\text{masa semillas de chía (g)}} \cdot 100 \quad (2)$$

#### 3.2.2. Filtrado y centrifugado

Una vez obtenido el aceite mediante el proceso de prensado en frío, se debe llevar a cabo la limpieza del aceite para eliminar los residuos sólidos que aún contenga y que estos queden separados. El primer paso de esta separación será un filtrado simple mediante el uso de un papel de filtro y un embudo tal y como se muestra en la [Figura 18](#).



**Figura 18.** Partes del proceso de filtrado.

Al acabar el filtrado, es probable que quede poso no filtrado el cual se debe recolectar y separar del aceite. Para ello se utilizó la centrifugadora “Medibas 2740” obtenida por “Nahita” ([Figura 19](#)). Las condiciones de trabajo de la centrifugadora han sido a 10.000 RPM durante 30 minutos y a 22 °C. Es muy importante que los cuatro brazos de la centrifugadora tengan un peso compensado para que se realice el proceso correctamente.



**Figura 19.** Máquina centrífuga.

### 3.2.3. Proceso de epoxidación

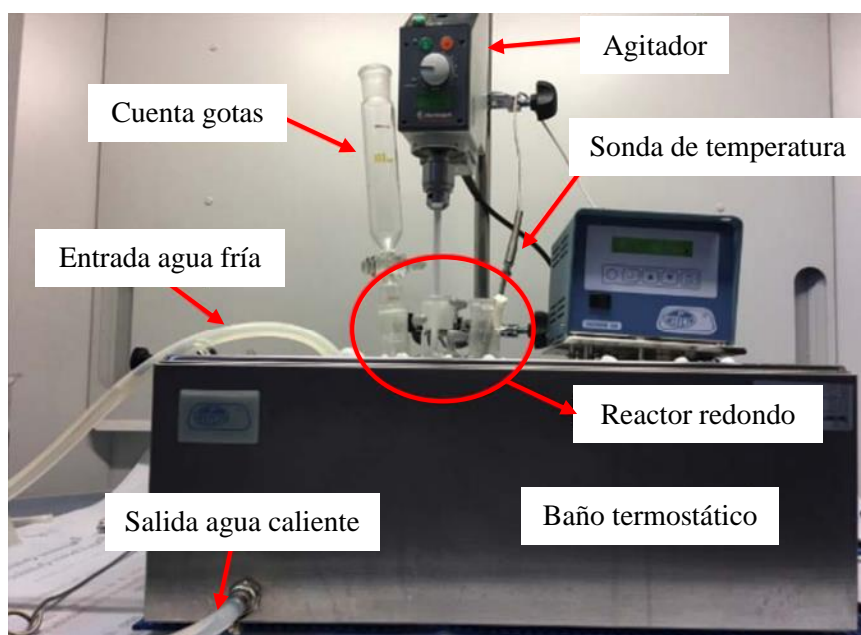
El proceso de epoxidación tendrá una durabilidad alrededor de 8 horas. Para ello, se van a necesitar una serie de reactivos los cuales van a actuar como catalizadores y portadores del grupo epoxy. Es el caso del ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

#### 3.2.3.1. Montaje experimental

Para el proceso de epoxidación del aceite de semilla de chía, se ha empleado el uso de los siguientes equipos:

- Reactor redondo de tres cuellos (1 L).
- Termómetro digital con medición desde  $-50^\circ\text{C}$  hasta  $300^\circ\text{C}$ .
- Agitador desde 5 hasta 2000 rpm.
- Cuenta gotas 100 ml.
- Baño termostático con control de temperatura.

En la [Figura 20](#), se puede observar la disposición del montaje experimental donde, al tratarse de un proceso exotérmico, se utiliza un baño termostático para aumentar la temperatura hasta llegar a la requerida y mantenerla constante durante todo el experimento. Asimismo, se observa que en cada cuello del reactor redondo se introduce un elemento ya sea catalizador o acelerador.



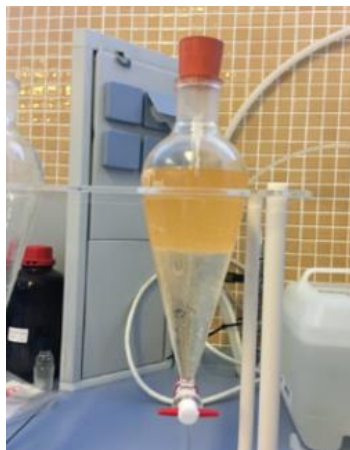
**Figura 20.** Montaje experimental del proceso de epoxidación.

#### 3.2.3.2. Metodología empleada

El proceso seguido para obtener el aceite de la semilla de chía epoxidado es el siguiente:

1. Introducir volumen conocido de aceite de semilla de chía en el reactor redondo de tres cuellos.
2. Calentar aceite de chía hasta la temperatura requerida ( $75^{\circ}\text{C}$ ), mientras está en agitación continua constante.
3. Introducir el volumen necesario del ácido acético en el reactor y esperar a que la temperatura vuelva a la requerida, para luego introducir la mezcla requerida de peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico gota a gota al reactor. La relación que se sigue para la introducción de estos compuestos es:
  - a. El ratio molar de ácido acético respecto a los moles de dobles enlaces presentes en el aceite será de 0,5 a 1.
  - b. El peróxido de hidrógeno se introduce en un ratio molar de 2 a 1 respecto a los moles de dobles enlaces presentes en el aceite.
  - c. El ácido sulfúrico se introduce en un 2% en peso respecto a la masa total de ácido acético y peróxido introducido.

4. Una vez introducido todo en el reactor, mantener la temperatura constante durante 8 h. Cuando la temperatura se eleva demasiado de la requerida, se introduce agua fría en el baño, de tal forma que se mantiene la temperatura bastante constante.
5. Una vez pasadas las 8 horas del proceso. Se recoge la muestra final para realizar su posterior caracterización. Cogiendo suficiente muestra para abarcar los análisis necesarios.
6. Una vez se haya producido la reacción, decantar mediante un embudo de decantación (Figura 21) y se introduce en una centrifugadora a 8000 rpm para separar y poder eliminar el exceso de disolvente no reaccionado en el proceso de epoxidación.



**Figura 21.** Embudo de decantación aceite de chía epoxidado.

#### 3.2.3.3. Técnicas de caracterización del aceite

Una vez realizado el proceso de epoxidación, se pueden realizar diferentes tipos de análisis para caracterizar el aceite epoxidado obtenido. Así se puede saber si el proceso se ha realizado de manera óptima y se han obtenido resultados competitivos. En este proceso se determinará el porcentaje de oxígeno oxiránico (grupos epoxy) y el índice de yodo (IV).

En el presente trabajo no se le dará importancia al procedimiento de obtención de los siguientes parámetros ya que el objetivo no es optimizar las reacciones. Se parte de la base de que estos parámetros ya están optimizados y se les aplica un mejor ratio y temperatura para el proceso a nivel industrial.

#### **Determinación oxígeno oxiránico**

Esta técnica permite conocer el porcentaje de oxígenos oxiránicos (grupos epoxy) que se han introducido en las cadenas de ácidos grasos. Es decir, muestra si realmente el proceso de epoxidación se ha producido con una alta conversión o si es necesario optimizar el proceso para obtener un aceite más epoxidado. La medición de esta técnica viene dada por la norma ASTM D 1652-97 [49].

Siguiendo la norma y los ratios mostrados en el proceso de epoxidación (2 peróxido : 0,5 ácido acético : 1 aceite) se ha obtenido un porcentaje de oxígeno oxiránico de 7,3 wt. %. Este valor es bastante elevado ya que indica que se han formado experimentalmente 7,3 g de grupos epoxy por cada 100 g de aceite de chía. Este valor da indicios de que el proceso de epoxidación se ha realizado correcta y efectivamente. Además, es un valor cercano al aceite epoxidado de linaza el cual es el aceite más empleado comercialmente y tiene un porcentaje de grupos epoxy del 9 wt. % [54].

#### **Determinación del índice de yodo (IV)**

Este método de caracterización se emplea con el objetivo de conocer la disponibilidad de dobles enlaces presentes en los ácidos grasos del aceite de chía. Con este método, se puede determinar la proporción previa de dobles enlaces que hay en el aceite virgen de chía. Se hace uso de la norma UNE-EN ISO 3961 [50]. Cabe destacar que se parte de un valor de IV del aceite de chía limpio de 199 I<sub>2</sub> g/ 100g, obtenido al aplicar la norma antes de realizar el proceso de epoxidación y maleinización.

Una vez conocidos los datos y aplicando la norma, el valor obtenido ha sido de 114 I<sub>2</sub> g / 100 g aceite virgen, es decir, se han obtenido 114 mg de yodo absorbidos por los dobles enlaces de cada 100 g de aceite. Éste es un valor muy elevado en comparación a otros tipos de aceites como se puede observar en la [Tabla 1](#).

Por tanto, este aceite destaca por el elevado número de insaturaciones que tienen los ácidos grasos que contiene teniendo así una gran aplicabilidad e interés a nivel ingenieril, ya que al tener una gran cantidad de insaturaciones, el aceite será muy reactivo y mayor cantidad de puntos reactivos tendrá para sustituir esas cadenas por oxígenos oxiránicos formando así un elevado número de grupos epoxy que se podrán unir con más cadenas epoxidadas formando una estructura reticular muy compacta ofreciendo.

#### 3.2.4. Proceso de maleinizado

Al finalizar la obtención del aceite a partir de semilla de chía, al igual que se aplica el método de epoxidación al aceite, para conseguir un aceite epoxidados que actúe como resina epoxy del polímero termoestable, también se realiza un proceso de maleinización del aceite de semilla de chía para que el aceite, esta vez maleinizado, actúe como endurecedor en la formación del termoestable.

Este endurecedor de proveniente de fuentes renovables se utilizará en diferente composición junto a un endurecedor de origen petroquímico como el anhídrido de metilo nádic (MNA).

##### 3.2.4.1. Montaje experimental

Para el proceso de maleinización del aceite de semilla de chía se ha hecho uso de los siguientes equipos:

- Reactor redondo de tres cuellos (1 L).
- Termómetro digital con medición desde -50 hasta 300 °C.
- Agitador mecánico desde 5 hasta 2000 rpm.
- Manta calefactora.

En la [Figura 22](#), se observa el montaje experimental del proceso de maleinización. Al tratarse de un proceso exotérmico, es necesario el empleo de una manta calefactora que permita elevar la temperatura hasta la requerida y mantenerla constante durante todo el experimento. Sobre la manta calefactora se coloca el reactor de tres bocas. En una de las bocas del reactor se introduce el sensor de temperatura, en otra el agitador mecánico, la restante es utilizada para la adición de anhídrido maleico, siendo ésta última posteriormente tapada.

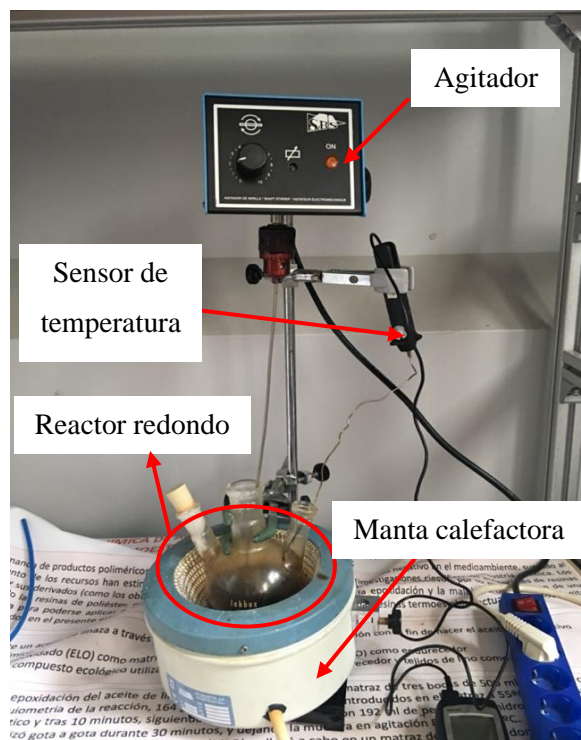


Figura 22. Montaje experimental maleinización de aceite de chía.

#### 3.2.4.2. Metodología empleada

El proceso seguido para obtener el aceite de la semilla de chía maleinizado es el siguiente:

1. Introducir volumen conocido de aceite de semilla de chía en el reactor redondo de tres cuellos.
2. Calentar el aceite de chía hasta la temperatura requerida (180 °C) mientras está en agitación continua constante y añadir 9 g de anhídrido maleico ( $C_2H_2(CO)_2O$ ) por cada 100 g de aceite, siendo un ratio molar (2,3:1) de maleico respecto al aceite de chía. Mantener durante 1 hora.
3. Repetir el paso anterior pero esta vez a una temperatura de 200 °C y adicionando la misma cantidad de anhídrido maleico con el mismo ratio molar y mantener la temperatura constante durante 1 hora.
4. Adicionar de nuevo la misma cantidad de anhídrido maleico pero esta vez a una temperatura de 220 °C y mantener la temperatura constante durante 1 hora.



#### 3.2.4.3. Técnicas de caracterización del aceite

Al igual que con el proceso de epoxidación, también se pueden realizar análisis para la caracterización del aceite maleinizado. En este caso, se podría determinar el índice de yodo ya descrito en el proceso de epoxidación y el índice de acidez.

##### **Índice de acidez ( $w_{AV}$ )**

Para conocer si el aceite se ha maleinizado se realiza un análisis del índice de acidez ( $w_{AV}$ ). Este índice indica la cantidad de hidróxido potásico (KOH) necesario para neutralizar los ácidos grasos presentes libremente en 1 g de aceite. La determinación de dicho índice se realiza siguiendo la norma UNE-EN ISO 660:2021 [51]. Esta técnica se utiliza también para comprobar que el aceite de chía sin maleinizar esté libre de anhídrido maleico (AM).

Teniendo en cuenta los datos obtenidos y siguiendo la norma y las ecuaciones necesarias, se obtiene un valor de índice de acidez de manera experimental tras 3 horas del 119,7 mg KOH / g aceite. Este valor indica que ha habido una elevada sustitución de grupos maleicos en las insaturaciones de la molécula, por lo que el proceso de maleinización se ha realizado correctamente.

##### **Determinación del índice de yodo (IV)**

En el caso del proceso de maleinización, siguiendo la misma norma que se empleó anteriormente [50], se obtuvo que el índice de yodo (IV) del aceite de chía maleinizado es de 103,8 I<sub>2</sub> g/ 100 g. Este valor es menor que el obtenido en la epoxidación, lo que significa que el MCSO presenta menos dobles enlaces que el ECSO.

#### 3.2.5. Proceso de obtención de probetas

Para la obtención de las resinas y elaborar el termoestable en probetas para su posterior caracterización mecánica, se deben tener en cuenta una serie de pasos y consideraciones.

En primer lugar, cabe resaltar que las muestras se prepararon en una relación de formulación Epoxy Equivalent Weight (EEW): Anhídrido Equivalent Weight (AEW) de 1:1 ya que esta relación mostró el mejor comportamiento de equilibrio para obtener el máximo grado de reticulación.

### 3. Desarrollo del proyecto

---

En el presente trabajo se realizaron varias pruebas mezclando el aceite de semilla de chía epoxidado (ECSO) con dos agentes reticulantes, uno de origen petroquímico (MNA) y otro de origen renovable (aceite de semilla de chía maleinizado, MCSO) según la relación molar porcentual recogida en la [Tabla 3](#).

La mezcla se agitó manualmente y se templó en la estufa a una temperatura de 80 °C con el objetivo de asegurar una buena mezcla sobre todo con el MCSO. Seguidamente, una vez conseguida la mezcla anterior, se debe añadir imidazol como acelerador para luego mezclar todos los componentes manualmente hasta conseguir una buena homogeneización.

Esta mezcla líquida obtenida se colocó en moldes de silicona a 80 °C con unas dimensiones de 80 × 10 × 4 mm<sup>3</sup> con la intención de evitar el choque térmico. Posteriormente, este molde de silicona se coloca en una estufa modelo “CONTERM 80L” del proveedor “J.P Selecta” (Barcelona, España).

Finalmente, el ciclo de curado fue de 3 horas a una temperatura de 90°C la cual se obtuvo con un análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) como la temperatura para alcanzar el máximo entrecruzamiento. Luego, se realizó un postcurado de 1 h a 130°C.

**Tabla 3.** Composiciones endurecedores fabricación termoestable

<b>Mezcla</b>	<b>MNA (%)</b>	<b>MCSO (%)</b>	<b>Bio-Basado (%)</b>
MNA 100	100	0	54,2
MNA 70 : MCSO 30	70	30	69,4
MNA 50 : MCSO 50	50	50	78,5
MNA 30 : MCSO 70	30	70	86,8
MCSO 100	0	100	98,0

## 3.3. Técnicas de caracterización mecánica del polímero

Una vez se ha formado el polímero termoestable, se le aplicará una serie de métodos de caracterización mecánica para así conocer las propiedades mecánicas del termoestable obtenido. Una vez obtenidas, se comparará con termoestables de origen petroquímico y así estudiar el potencial de nuestros materiales de origen renovable y respetuosos con el medioambiente.

### 3.3.1. Ensayo Charpy: prueba de impacto

El ensayo Charpy es un tipo de ensayo llamado “de resiliencia” ya que estos son aquellos procedimientos en los que, aplicando un esfuerzo brusco, se determine el grado de tenacidad del polímero, así como el grado de fragilidad a la fractura que pueda presentar. La energía absorbida en el impacto está directamente relacionada con la tenacidad, fragilidad y ductilidad del material.

El ensayo de impacto consiste en dejar caer un péndulo pesado, el cual golpea una probeta ubicada en unos soportes en la base de la máquina. El péndulo se deja caer desde un ángulo determinado para que alcance la velocidad requerida en el momento del golpe para que cumpla los requerimientos de la norma requerida que para el presente trabajo se utilizó la norma UNE-EN ISO 179-2021. “*Plásticos. Determinación de las propiedades frente al impacto Charpy*”. Luego de golpear la probeta, el péndulo seguirá su camino alcanzando cierta altura dependiendo de la cantidad de energía absorbida por la probeta durante el impacto.

En este caso, al utilizar estos métodos con probetas de polímero termoestable, éste presentará una mayor fragilidad debido a la baja ductilidad que presenta en comparación con polímeros como los termoplásticos y los elastómeros y por tanto no se doblarán ni presentarán una elevada deformación durante el impacto. El péndulo utilizado es un péndulo Charpy de 6 J de “Metrotec S.A” (San Sebastián, Gipuzkoa, España) tal y como se muestra en la [Figura 23](#), éste es un péndulo pequeño y con poca fuerza en comparación con los utilizados en materiales metálicos ya que para el polímero que se va a caracterizar es suficiente.



**Figura 23.** Péndulo Charpy.

#### **3.3.2. Ensayo de dureza**

La dureza es la medida de la resistencia de un material (en este caso un plástico) contra la penetración de un cuerpo más duro. Es decir, la resistencia de éste a la deformación permanente. En el caso del polímero termoestable que se posee como objeto de estudio, se va a seguir la norma ISO 868:2003. *“Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza de indentación por medio de un durómetro”* para determinar su dureza.

El proceso consiste en aplicar un penetrador específico al material de ensayo bajo condiciones específicas y midiendo la profundidad de penetración.

La dureza de penetración es inversamente proporcional a la penetración y depende del módulo de elasticidad y las propiedades viscoelásticas del material. La forma del penetrador, la fuerza aplicada sobre él y la duración de su aplicación influyen sobre los resultados obtenidos.

### 3. Desarrollo del proyecto

---

Estos valores se determinan usando una escala (A para materiales flexibles y D para los más rígidos) y un número asignado de 0 a 100, cuanto mayor sea el número mayor será la dureza. Para este ensayo se usó un durómetro 673-D de J. Bot S.A (Barcelona España) tal y como aparece en la [Figura 24](#).



**Figura 24.** Durómetro Shore D.

### 3.4. Resultados

En este apartado se expondrán y analizarán los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización mecánica del polímero termoestable siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

Por otro lado, además de analizar dichos resultados, estos se compararán con resinas termoestables comerciales que sean 100% de origen petroquímico, para así observar las diferencias entre cada una de ellas y valorar si realmente se consigue alcanzar, con las resinas termoestables de origen renovable, propiedades competentes con las comerciales de origen fósil.

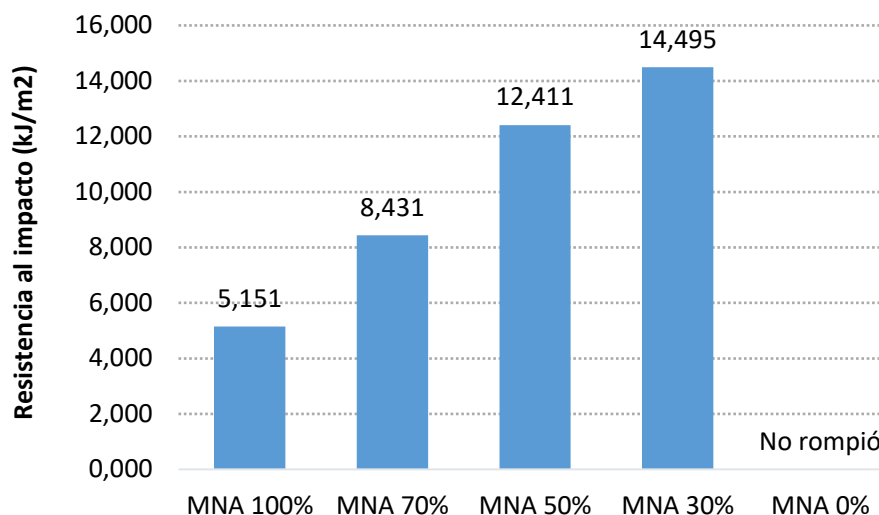
#### 3.4.1. Ensayo Charpy: prueba de impacto

En la [Tabla 4](#) se muestran los datos obtenidos de manera experimental en la prueba de impacto Charpy. En esta tabla se encuentra la media de los datos de impacto obtenidos, así como la desviación estándar y el porcentaje de error obtenido para cada probeta termoestable con diferente composición de MNA y MSCO.

**Tabla 4.** Datos experimentales, desviación y error del ensayo Charpy.

<b>Muestras</b>	<b>Resistencia al impacto (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación</b>	<b>Error (%)</b>
MNA100	5,151	0,400	7,766
MN70	8,431	1,090	12,924
MNA50	12,411	1,091	8,788
MNA30	14,495	2,000	13,798
MNA0	No rompió	-	-

En la [Figura 25](#) se muestra la representación gráfica de los datos obtenidos en la [Tabla 4](#) de manera experimental. Cabe tener en cuenta que, las propiedades mecánicas de las muestras están estrictamente relacionadas con la estructura química del agente de reticulación o endurecedor. Es decir, por un lado, el MNA proporciona una reticulación de las cadenas muy compacta y rígida [52]. En cambio, las cadenas de ácidos grasos de los aceites vegetales modificados provocan un aumento del volumen libre, lo que deriva en un aumento de la flexibilidad y disminución de la rigidez [53].



**Figura 25.** Representación de los datos experimentales de resistencia al impacto (kJ/m<sup>2</sup>)

Como se puede observar en los resultados obtenidos, la energía absorbida por el impacto está relacionada con la capacidad de absorber energía durante la deformación que sufre el material. Siguiendo dicho criterio, la muestra “MNA 100%”, la cual es la que contiene un 100% de MNA en la composición del endurecedor, mostró la capacidad de absorción de energía más baja debido a su frágil comportamiento, provocado porque la estructura interna de esta muestra está muy entrecruzada, provocando un menor movimiento de las cadenas al aplicar un esfuerzo sobre ella y, por tanto, proporcionando buenas propiedades mecánicas resistentes, pero, en contrapartida, una alta fragilidad.

A medida que aumenta el contenido de MCSO, se aprecia una mayor cantidad de energía absorbida, provocada por el aumento de la flexibilidad y propiedades dúctiles del material. Este aumento es tal que, llega un punto donde la probeta “MNA 0%”, que contienen endurecedor 100 % maleinizado, ha obtenido propiedades dúctiles tan elevadas que no rompe. Esto se debe a que dicho polímero tiene una estructura interna con un grado de entrecruzamiento menor al resto y el endurecedor MSCO posee una mayor longitud de cadena que el MNA proporcionando así dicha ductilidad y también un mayor volumen libre al incorporarse entre las cadenas de aceite epoxidado. Esto permite el deslizamiento de las cadenas poliméricas al aplicar una fuerza externa, obteniendo así unas peores propiedades mecánicas resistentes, pero aumentando sus propiedades dúctiles y una mayor resistencia al impacto.

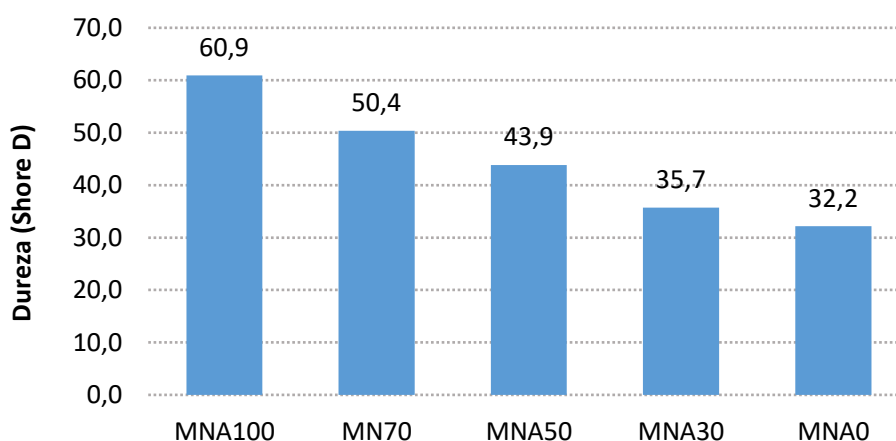
### 3.4.2. Ensayo de dureza

En la [Tabla 5](#) se muestran los datos obtenidos experimentalmente del ensayo de dureza. Estos datos reflejan la media de los valores de dureza obtenidos para cada una de las cinco muestras, junto con la desviación estándar y el porcentaje de error obtenido.

**Tabla 5.** Datos experimentales, desviación y error del ensayo de dureza.

Muestra	Dureza (Shore D)	Desviación	Error (%)
MNA100	60,9	2,92	4,801
MN70	50,4	3,90	7,746
MNA50	43,9	3,80	8,664
MNA30	35,7	2,80	7,845
MNA0	32,2	2,80	8,707

Seguidamente, en la [Figura 26](#) se muestran representados los datos de dureza expuestos en la tabla anterior donde se observan unos resultados con una tendencia a la inversa comparándola con la vista en el ensayo de impacto. Esto es debido a que, a mayor ductilidad y flexibilidad de la muestra, menor dureza presentará. Por tanto, dependiendo el porcentaje de endurecedor petroquímico y natural que contenga la muestra, ésta proporcionará mayor o menor dureza.



**Figura 26.** Representación de los datos experimentales de dureza Shore D.

Analizando los resultados obtenidos, se observa que, al contrario que con el ensayo de impacto, los valores de dureza disminuyeron de 60,9 a 32,2 para la muestra “MNA 100%” y “MNA 0%” respectivamente como consecuencia del comportamiento dúctil de las muestras al añadir más cantidad de MCSO y menor porcentaje de MNA.



### 3. Desarrollo del proyecto

El valor de la muestra con un 100% de endurecedor petroquímico MNA, obtiene las propiedades más duras ya que es la muestra con la estructura más entrecruzada, lo que le otorga la máxima dureza y propiedades mecánicas resistentes. Por el contrario, esta dureza va disminuyendo hasta llegar al mínimo valor obtenido en la muestra con un 100% de endurecedor bio MCSO. Es debido a que el MCSO proporciona una mayor longitud de cadena de entrecruzamiento y, por tanto, un mayor volumen libre por lo que se adquieren unas propiedades más dúctiles y flexibles. Es por ello que su dureza se ve disminuida en comparación con las demás muestras.

Por lo tanto, dependiendo de la formulación, es posible fabricar muestras termoestables con una amplia gama de propiedades mecánicas desde alta rigidez (muestra MNA100) y con además un 54,2% de origen bio, hasta muestras de alta ductilidad con alto contenido de base biológica de hasta el 98% (MCSO 100).

#### 3.4.3. Comparativa con resinas termoestables comerciales

Una vez caracterizados las diferentes muestras con proporción resina epoxy 1:1 relación molar endurecedor, variando la composición tanto renovable como fósil siguiendo la [Tabla 5](#), se van a comparar los resultados obtenidos con dos tipos de resinas termoestables comerciales de origen 100% petroquímico para evaluar las diferencias que presentan.

En la [Figura 27](#) se muestra una comparativa de los valores de dureza Shore D, resistencia al impacto ( $\text{kJ/m}^2$ ) y %bio de las muestras ya nombradas para observar de manera más gráfica dichos cambios en sus propiedades.

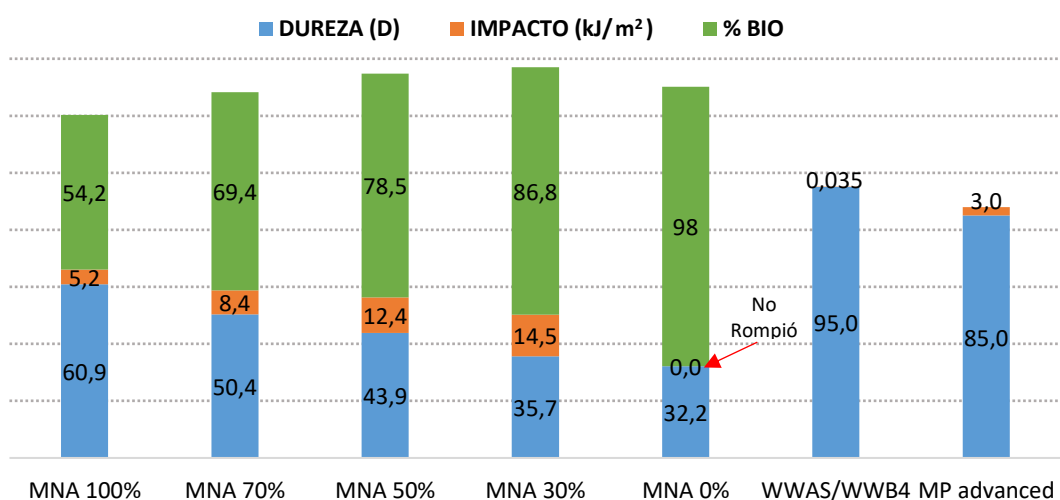


Figura 27. Comparativa muestras experimentales con comerciales

En primer lugar, en cuanto a la dureza Shore D, se observa que los compuestos petroquímicos mostrados tienen valores más elevados que los que tienen un porcentaje bio en su composición. A medida que hay más cantidad de MNA, mayor dureza se consigue y menor es la diferencia con la mezcla de resinas 100% petroquímicas.

Seguidamente, comparando los valores de resistencia al impacto, las resinas con % bio presentan una mayor resistencia debido a que tienen una mayor flexibilidad y características dúctiles que les permiten aguantar impactos externos sin romperse, disminuyendo así la alta fragilidad que presentan las resinas termoestables 100% petroquímicas.

Finalmente, es importante resaltar que, aunque las resinas totalmente petroquímicas tengan una mayor dureza, esto sólo servirá para un determinado número de aplicaciones como por ejemplo laminados o elaboración de piezas que requieran una elevada dureza como piezas ópticas. En cambio, estas son resinas muy contaminantes para el medio ambiente, sobre todo en la fase de obtención de la materia prima y, como en cualquier termoestable, en su fin de ciclo de vida, lo cual es un factor a tener en cuenta ya que, cada vez está más demandado y regulado el uso de compuestos con alto porcentaje de materia fósil.

Por ello, las resinas obtenidas en el presente trabajo, además de tener un alto porcentaje renovable en cuanto a materias primas se refiere (según el porcentaje de maleinizado que se introduzca) pueden llegar a presentar valores bastante aceptables de dureza Shore D, entre 40-60. Además, el tener buenos valores de resistencia al impacto, permite usar estos tipos de resinas en muchas más aplicaciones donde no prime una dureza y rigidez demasiado elevada. Sectores donde se requieran compuestos con menor fragilidad como, por ejemplo, en la creación de moldes, encapsulación de figuras y elementos decorativos, utilización en elementos náuticos (tablas de surf, piezas para barcos, etc.) reparación de superficies o como relleno de huecos entre otras.

Asimismo, no se debe olvidar el factor bio ya que contienen un altísimo porcentaje de materia prima de origen renovable. Esto permite su adaptación a las nuevas tendencias, y al creciente interés por productos biobasados y menos contaminantes para el medio ambiente, lo cual es un punto a tener en cuenta en la industria.

## **4. ESTUDIO ECONÓMICO**

### 4.1. Diseño de las instalaciones a escala industrial

En este apartado, se procederá a realizar el diseño por separado de cada uno de los equipos de obtención del aceite de semilla de chía y de producción de resinas, tanto epoxidadas, que actuarán de base polimérica, como de resinas por maleinización que actuarán como endurecedor junto al MNA. En concreto el objetivo es conseguir, entre la resinas epoxy y endurecedor (resina maleinizada y petroquímica), una producción diaria de al menos 50 kg.

En el presente trabajo, de las muestras poliméricas con diferentes proporciones de endurecedor petroquímico y renovable que se caracterizaron, se va a escoger para su producción a nivel industrial la muestra con un ratio de MNA 50:50 MCSO. Esto es debido a que, al mezclar los endurecedores con dicho ratio junto con las resinas epoxy en un ratio (1:1) se obtienen propiedades intermedias entre dureza y flexibilidad que abarcan un mayor abanico de aplicaciones y usos tanto a nivel doméstico como industrial.

Por tanto, partiendo de la base de que se van a producir 25 kg/día de aceite de chía epoxidado (ECSO), será necesario al menos, una cantidad de 15,63 kg de aceite de chía maleinizado y unos 10,12 kg de endurecedor petroquímico (MNA). Además, 1,02 kg será de imidazol, que actúa como acelerador en la reacción de formación del termoestable. Estos datos hacen un total de 51,77 kg superando así la producción de 50 kg/día fijada como mínima.

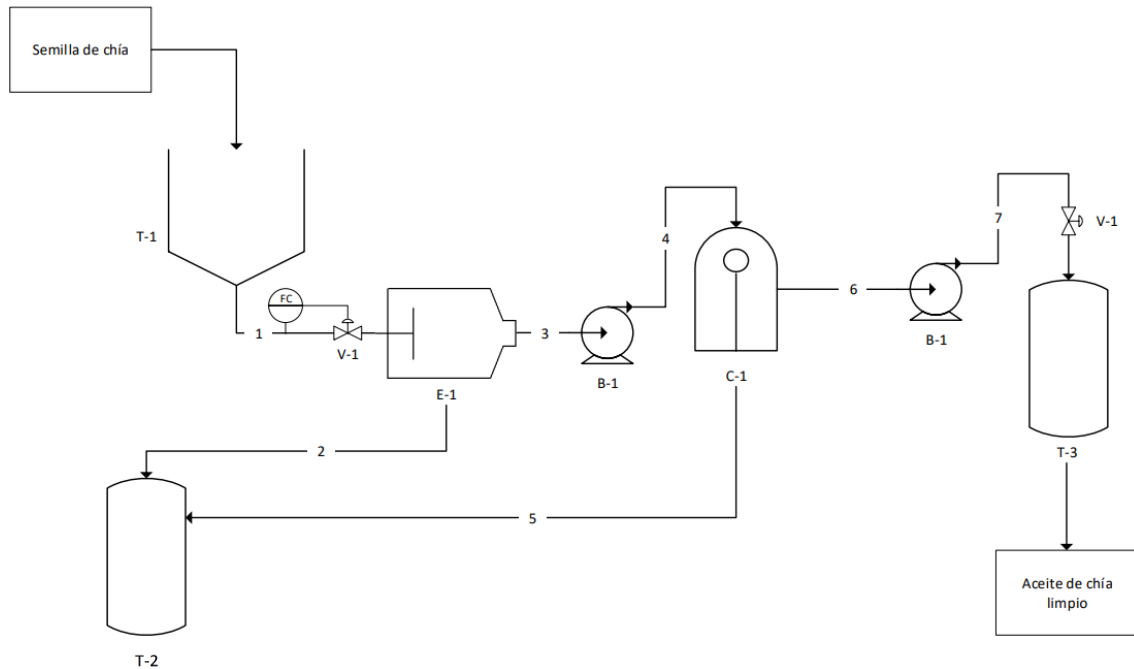
Es conveniente resaltar que, aunque se comercialicen todos estos componentes, solo se producirá ECSO y MCSO. Tanto el MNA como el imidazol se obtendrán y comercializarán directamente sin producirlos.

Por último, es importante resaltar que, los 51,77 kg de producto que se comercializarán al día irán divididos en kits o productos comerciales de 1 kg. Esto supone que el kit contendrá 0,483 kg de ECSO, 0,302 kg de MCSO, 0,195 kg de MNA y 0,02 kg de imidazol. Por tanto, se producirán 51 kits al día, dejando los 0,77 kg restantes para el día siguiente.

Sabiendo estos datos, se realizará un dimensionamiento de los equipos y, además, se presentarán las principales características y especificaciones de estos equipos a nivel comercial los cuales tendrán unas propiedades similares a dichos equipos dimensionados.

### 4.1.1. Etapa 1: Obtención de aceite de chía

En la [Figura 28](#) se muestra el proceso de producción para la obtención del aceite de chía a partir de la semilla de chía mediante un diagrama de flujos. En este se muestran las etapas de extrusión, filtrado y centrifugado para posterior almacenamiento del aceite.



**Figura 28.** Diagrama de flujos. Proceso industrial de obtención de aceite de chía.

Donde:

- T-1: Silo de almacenamiento semilla de chía.
- T-2: Tanque de almacenamiento residuo lignocelulósico.
- T-3: Tanque de almacenamiento aceite de chía.
- B-1: Bomba centrífuga.
- E-1: Extrusora para prensado en frío de las semillas de chía.
- C-1: Centrífuga de aceite de chía.
- FC: Controlador de caudal.
- V-1: Válvula.

#### 4.1.1.1. Diseño centrífuga para la obtención de aceite limpio

En esta etapa se eliminó todo el residuo sólido que quedó del proceso de extrusión. Como se mostró anteriormente, para el proceso productivo, se fijó una cantidad de 25 kg de ECSO lo cual, mediante los cálculos pertinentes, se obtienen 15,63 kg de MCSO haciendo un total de 40,63 kg de aceite limpio.

El proceso no es ideal y la centrífuga elegida tiene un rendimiento del 98,6% tal y como marcan sus especificaciones [55]. Por tanto, mediante el uso de la [ecuación 3](#) se obtiene el flujo de aceite sucio que entra a dicha centrífuga para obtener aceite limpio.

$$\dot{m}_{\text{CSO}_s} = \dot{m}_{\text{CSO}_L} \cdot \frac{100}{R} \quad (3)$$

Donde:

- $\dot{m}_{\text{CSO}_s}$ : Flujo másico de aceite de semilla de chía sucio (kg/día).
- $\dot{m}_{\text{CSO}_L}$ : Flujo másico de aceite de semilla de chía limpio (kg/día).
- R: Rendimiento obtenido de las especificaciones del producto (%).

Aplicando la ecuación se obtiene:

$$\dot{m}_{\text{CSO}_s} = 40,63 \text{ kg/día} \cdot \frac{100}{98,6} = 41,21 \text{ kg/día}$$

Las especificaciones de este equipo a nivel comercial se muestran en la [Tabla 6](#) junto con una ilustración mostrada en la [Figura 29](#).

**Tabla 6.** Características generales separadora centrífuga



**Figura 29.** Separadora centrífuga [55].

<b>Especificaciones C-1</b>	
Capacidad de producción (l/min)	3
Fuente de alimentación	24 V
<b>Propiedades C-1</b>	
Altura (mm)	305
Anchura (mm)	210
Longitud (mm)	104

#### 4.1.1.2. Diseño extrusora para obtención de aceite sucio de chía

La extrusora es un equipo clave en el proceso ya que es el que permitirá obtener todo el aceite necesario para realiza los posteriores tratamientos y procesos para conseguir el producto final.

Es necesario contar con una extrusora que sea lo suficientemente grande para poder extruir la cantidad de semillas necesarias en el menor tiempo y el mayor rendimiento posible.

Mediante la implementación de la [ecuación 4](#), se puede obtener el caudal másico de semilla de chía que entrará al día en la extrusora para obtener así los 41,21 kg de aceite sucio.

$$\dot{m}_{CS} = \dot{m}_{CSO_s} \cdot \frac{100}{R} \quad (4)$$

Donde:

- $\dot{m}_{CS}$ : flujo molar de semilla de chía (kg/día).
- $\dot{m}_{CSO_s}$ : flujo molar de aceite de semilla de chía (kg/día).
- R: Rendimiento extrusora (%).

Aplicando la ecuación se obtiene:

$$\dot{m}_{CS} = 41,21 \text{ kg/día} \cdot \frac{100}{24,46} = 168,48 \text{ kg/día}$$

Una vez determinado el caudal que debe tratar la extrusora, en la [Tabla 7](#) aparecen las especificaciones de la extrusora empleada a nivel comercial ([Figura 30](#)). Se ha seleccionado esta extrusora debido a que tiene una producción de 160 kg/h por lo que, en aproximadamente 1,05 h se obtendrá el aceite sucio que pasará a la centrífuga.

Tabla 7. Características generales extrusora



Figura 30. Extrusora obtención CSOs [56].

<b>Especificaciones E-1</b>	
Capacidad de producción (kg/h)	160
Potencia (kW)	3
<b>Propiedades E-1</b>	
Altura (mm)	1260
Anchura (mm)	860
Longitud (mm)	1400
<b>Peso E-1</b>	
Peso extrusora (kg)	280

#### 4.1.1.3. Diseño silo de almacenamiento de semilla de chía

Se decidió que la semilla de chía se almacenara directamente en un silo para que ésta cayese por gravedad a la extrusora y empezar así el proceso. De esta forma se ahorran elementos como válvulas y tanques extra que solo aportaban coste al equipo de producción.

Con la información obtenida en los cálculos de los equipos anteriores, se conoce que, el silo debe contener mínimo 168,48 kg/día. No obstante, está previsto que no se deba rellenar cada día el tanque, sino que éste tenga una capacidad de almacenaje de semilla para abastecer una semana laboral (5 días). Por tanto, las dimensiones de este cambian, aunque mediante una simple multiplicación como se muestra a continuación se puede obtener la cantidad que debería ser capaz de almacenar el tanque por semana.

$$\dot{m}_{CS} = 168,48 \text{kg/día} \cdot 5 \text{ días} = 842,4 \text{ kg/semana}$$

Sabiendo los parámetros anteriores y comparando diferentes equipos comerciales se ha elegido el silo de almacenamiento de la Figura 31 el cual tiene las especificaciones descritas en la Tabla 8. Su sistema de control aparece en el Apéndice 1.





Figura 31. Silo almacenamiento CS [57].

Tabla 8. Características generales silo de almacenamiento de CS.

Especificaciones T-1	
Capacidad por día (kg/día)	166,108
Capacidad por semana (kg/semana)	830,54
Propiedades T-1	
Altura (mm)	1495
Anchura (mm)	1000
Longitud (mm)	1200

#### 4.1.1.4. Diseño tanques almacenamiento residuo sólido y aceite limpio

Una vez se han obtenido los caudales y flujos másicos de esta primera etapa, se puede conocer el caudal a tratar para almacenar el residuo lignocelulósico sobrante del proceso de extrusión ( $\dot{m}_{LR}$ ) restando la cantidad de aceite sucio extraído a la cantidad total de semilla de chía, tal y como se muestra a continuación

$$\dot{m}_{LR} = 168,48 \text{ kg/día} - 41,21 \text{ kg/día} = 127,27 \text{ kg/día}$$

Este residuo se podrá utilizar en diferentes sectores como la ganadería, para venderlo a compradores interesados o para abrir en un futuro una planta de producción de algún polímero como el PLA donde haga falta dicho residuo, obteniendo así, otro tipo de materiales ecológicos.

En cuanto al volumen necesario se emplea la [ecuación 5](#).

$$V_{T-2} = \frac{\dot{m}_{LR}}{\rho_{CS}} \quad (5)$$

Donde:

- $V_{T-2}$ : Volumen tanque almacenamiento residuo sólido (L).
- $\rho_{CS}$ : Densidad harina de chía, obtenido de [68] (kg/L).

Aplicando la ecuación:

$$V_{T-2} = \frac{127,27 \text{ kg}}{0,417 \text{ kg/L}} = 305,20 \text{ L}$$

De igual manera, sabiendo que de la centrífuga salen 40,63 kg/día, aplicando de nuevo la [ecuación 5](#), se puede obtener el volumen del tanque necesario para almacenar el aceite limpio de chía ( $V_{T-3}$ ). Hay que tener en cuenta que la densidad ahora es del aceite de chía ( $\rho_{CO}$ ) y no de la semilla de chía ( $\rho_{CS}$ ).

$$V_{T-3} = \frac{40,63 \text{ kg}}{0,928 \text{ kg/L}} = 43,78 \text{ L}$$

Las características de ambos tanques escogidos comercialmente se ven reflejados en la [Tabla 9](#) junto a una ilustración de ambos ([Figura 32](#)) ya que el tanque es el mismo, solamente cambiando las dimensiones para adaptarse a cada requerimiento. Su sistema de control aparece en el [Apéndice 1](#).

**Tabla 9.** Características tanques almacenamiento etapa 1.

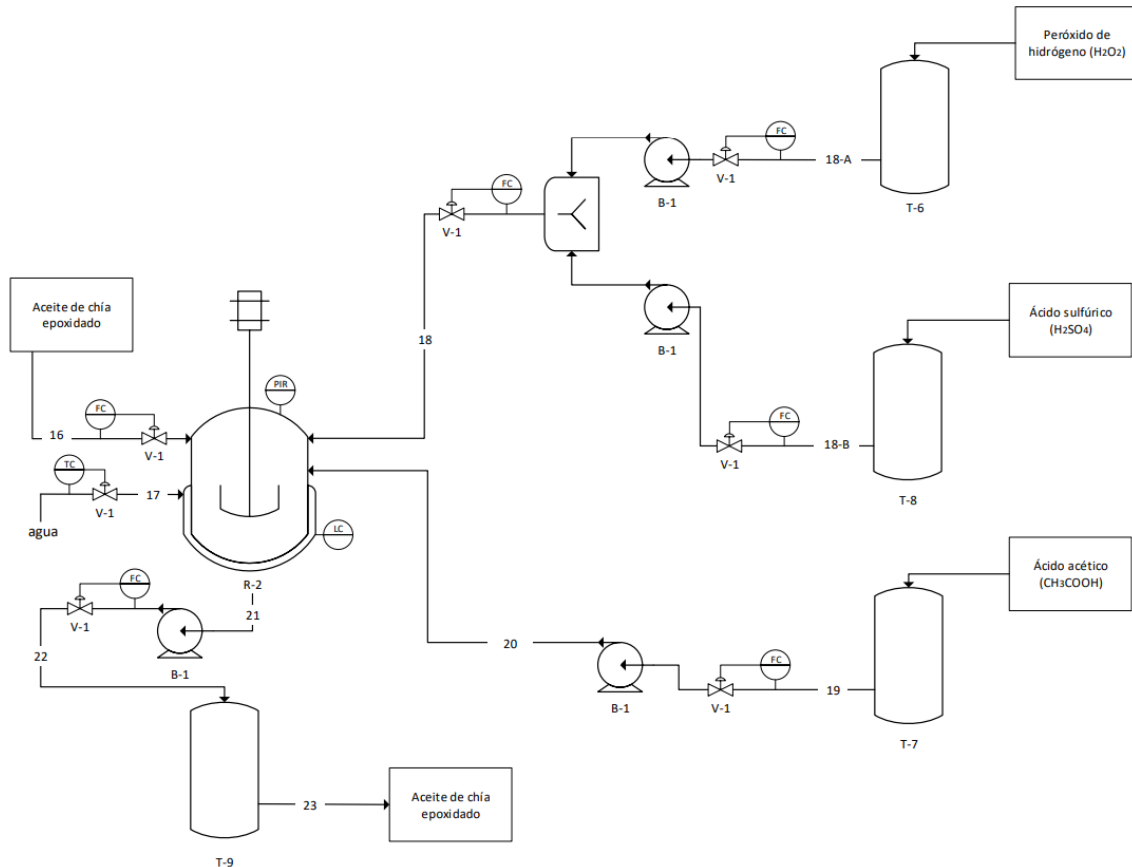
Especificaciones T-2		T-3
Presión diseño (atm)	1,02	
Temperatura (°C)	25	
Propiedades T-2		T-3
Altura (mm)	981	448,2
Diámetro (mm)	641,3	432,5
Volumen (L)	310	50



**Figura 32.** Tanque LR y CSOL [58]

### 4.1.2. Etapa 2: Epoxidación del aceite de chía

Una vez obtenido el aceite, se realiza el proceso de epoxidación el cual queda representado a escala industrial en la [Figura 33](#) mediante un diagrama de flujos. Destaca la introducción de los catalizadores y formadores de grupos epoxy necesarios en el reactor para que dé lugar la reacción de epoxidación.



**Figura 33.** Proceso industrial de obtención de aceite de chía epoxidado

Donde:

- T-6: Tanque almacenamiento  $H_2O_2$ .
- T-7: Tanque almacenamiento  $CH_3COOH$ .
- T-8: Tanque almacenamiento  $H_2SO_4$ .
- T-9: Tanque de almacenamiento aceite de chía epoxidado.
- TC: Controlador de temperatura.
- LC: Controlador de nivel.
- PIR: Indicador de presión.
- R-2: Reactor proceso de epoxidación.

#### 4.1.2.1. Diseño tanques almacenamiento de reactivos y aceite epoxidado.

Los catalizadores y agentes formadores de grupos epoxy en el proceso de epoxidación del aceite, tienen sus tanques de almacenamiento los cuales variarán sus dimensiones según el volumen que se necesite y el tiempo que se tardarán en reponer.

Dimensionar estos tanques será necesario para poder saber el volumen de almacenamiento de los reactivos utilizados en el proceso de epoxidación y el flujo que llegará a dicho tanque.

##### 4.1.2.1.1. Tanque ácido acético

En primer lugar, para el diseño del tanque de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), hay que tener en cuenta el ratio molar (0.5:1) respecto al aceite de chía. Sabiendo los valores del peso molar, riqueza y densidad del compuesto y, además los moles de dobles enlaces del aceite de chía, se puede obtener el volumen del tanque al día siguiendo la [ecuación 6](#).

$$V_{T-7} = \frac{r \cdot n_{DB} \cdot Mm \cdot 100}{\rho \cdot R \cdot 1000} \quad (6)$$

Donde:

- $V_{T-7}$ : Volumen tanque de almacenamiento de  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (L).
- r: Ratio molar ácido acético respecto aceite de chía.
- $n_{DB}$ : Moles de dobles enlaces en el aceite (mol)
- Mm: Masa molecular  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (g/mol)
- $\rho$ : Densidad  $\text{CH}_3\text{COOH}$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- R: Riqueza  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (%)

Aplicando dicha ecuación se obtiene el valor del volumen al día.

$$V_{T-7} = \frac{0.5 \cdot 196,02 \text{ mol} \cdot 60,05 \text{ g/mol} \cdot 100}{1,05 \text{ g}/\text{cm}^3 \cdot 99,7 \cdot 1000} = 5,62 \text{ L/día}$$

El tanque comercial se ha fijado que debe tener un volumen capaz de almacenar el volumen de acético para una semana laboral (5 días) por tanto el volumen mínimo que debe tener el tanque es:

$$V_{T-7} = 5,62 \text{ L/día} \cdot 5 \text{ días} = 28,11 \text{ L/semana}$$

**4.1.2.1.2. Tanque peróxido de hidrógeno**

Para este caso, el procedimiento es igual al del acético, la diferencia son los valores de los datos ya que el ratio en este caso es de 2:1. Por otro lado, el tiempo de relleno de peróxido de hidrógeno también será de una semana laboral por lo que este tanque se deberá dimensionar a dicho requerimiento, utilizando para ello la [ecuación 6](#).

$$V_{T-6} = \frac{2 \cdot 196,02 \text{ mol} \cdot 34,02 \text{ g/mol} \cdot 100}{1,11 \text{ g/cm}^3 \cdot 30 \cdot 1000} \cdot 5 \text{ días} = 200,23 \text{ L/semana}$$

**4.1.2.1.3. Tanque ácido sulfúrico**

En el caso del ácido sulfúrico, el procedimiento es un poco distinto ya que, en vez de tener ratio molar, el proceso marca que de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  se introduce un 2% de la masa del  $\text{CH}_3\text{COOH}$  y del  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Teniendo en cuenta este factor diferencial, se usa la [ecuación 7](#) para calcular el volumen de ácido sulfúrico.

$$V_{T-8} = \frac{(0,02 \cdot m_{\text{H}_2\text{O}_2} + m_{\text{CH}_3\text{COOH}}) \cdot 100}{\rho \cdot Mm \cdot 1000} \quad (7)$$

Donde:

- $V_{T-8}$ : Volumen del tanque de almacenamiento de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (L).
- $m_{\text{H}_2\text{O}_2}$ : Masa  $\text{H}_2\text{O}_2$  (g).
- $m_{\text{CH}_3\text{COOH}}$ : Masa  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (g)
- $\rho$ : Densidad  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $\text{g/cm}^3$ )
- $Mm$ : Masa molecular  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (g/mol)

Aplicando la ecuación:

$$V_{T-8} = \frac{(0,02 \cdot 13335,3 \text{ g} + 5885,52 \text{ g}) \cdot 100}{1,84 \text{ g/cm}^3 \cdot 98,08 \cdot 1000} = 0,22 \text{ L/día}$$

Al ser un volumen mucho menos elevado que el resto de los compuestos, se considera que la recarga del tanque será anual (cada 226 días laborales) para obtener un tanque con un volumen mayor el cual se conseguirá con mayor facilidad quedando el resultado:

$$V_{T-8} = \frac{0,22\text{L}}{\text{día}} \cdot 226 \text{ días} = 49,72 \text{ L/año}$$

#### 4.1.2.1.4. Tanque resina de aceite de chía epoxidado

Para el tanque de ECSO, el volumen es la suma de todas las corrientes de entrada que entran al reactor puesto que se considera que todo el producto que se epoxida, pasa por la corriente de salida hasta llegar al tanque de almacenamiento de ECSO sin pérdidas obteniendo así la [ecuación 8](#):

$$V_{T-9} = \dot{V}_{MCSO} = \dot{V}_{CSO} + \dot{V}_{H_2SO_4} + \dot{V}_{H_2O_2} + \dot{V}_{CH_3COOH} \quad (8)$$

Donde:

- $V_{T-9}$ : Volumen tanque de almacenamiento MCSO (L).
- $\dot{V}_{MCSO}$ ,  $\dot{V}_{CSO}$ : Flujo volumétrico de MCSO y CSO (L/día).
- $\dot{V}_{H_2O_2}$ ,  $\dot{V}_{H_2SO_4}$ : Flujo volumétrico de  $H_2O_2$  y  $H_2SO_4$  (L/día).
- $\dot{V}_{CH_3COOH}$ : Flujo volumétrico de  $CH_3COOH$  (L/día).


Aplicando la ecuación se obtiene el siguiente resultado:

$$V_{T-9} = 26,94 \text{ L/día} + 5,62 \text{ L/día} + 40,05 \text{ L/día} + 0,22 \text{ L/día} = 72,83 \text{ L}$$

#### 4.1.2.1.5. Comparativa dimensionamiento tanques de almacenamiento

En la [Tabla 10](#) se muestran los valores del volumen dimensionado, además de los volúmenes y medidas de los tanques comerciales, los cuales son idénticos en cuanto a materiales a los utilizados en la etapa 1. En el [Apéndice 1](#) aparece su sistema de control.

**Tabla 10.** Características tanques almacenamiento etapa epoxidación.



Especificaciones T-6		T-7	T-8	T-9
Presión (atm)	1,02	1,02	1,02	1,02
Temperatura (°C)	25	25	25	25
Dimensiones T-6		T-7	T-8	T-9
Altura (mm)	779,6	406,8	500	551,8
Diámetro (mm)	563,4	416,2	453	473,4
Volumen (L)	210	30	75	100

**Figura 34.** Tanques de reactivos [58]

#### 4.1.2.2. Diseño del reactor de epoxidación

La reacción química de epoxidación es uno de los procesos principales e imprescindibles para la producción de la resina epoxy de aceite de chía (ECSO). Por ello es importante realizar un diseño de dicho reactor acorde con las especificaciones y objetivos de producción planeados. Se trabajará con un reactor discontinuo de tanque agitado (RDTA) encamisado, es bastante económico y cumple con sus funciones.

##### 4.1.2.2.1. Especificación de las corrientes

Al reactor entran tres corrientes y sale una. Esas corrientes de entrada son; la corriente de aceite de chía (CSO), la de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) y la de la mezcla de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). En cambio, la corriente de salida es la que corresponde al aceite de semilla de chía epoxidado (ECSO) que será la resina que se comercialice como matriz polimérica en la formación del polímero termoestable de origen renovable.

Como se ha nombrado y calculado previamente, estos catalizadores y portadores de grupos epoxy tienen un determinado ratio molar respecto al aceite de chía, para así, junto con otros datos como sus densidades, pesos molares, riqueza y moles de dobles enlaces del aceite, obtener el volumen real por día que se necesita de estos para realizar la epoxidación de forma correcta.

En la [Tabla 11](#) se muestra un resumen con los resultados obtenidos y las especificaciones en cada una de las corrientes del reactor:

**Tabla 11.** Propiedades corrientes entrada y salida reactor de epoxidación.

	Corriente 16	Corriente 18		Corriente 20	Corriente 21
		Corriente 18-A	Corriente 18-B		
Fase	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
Temperatura (°C)	20	20	20	20	75
Presión (atm)	1	1	1	1	1
Caudal volumétrico (L/día)	26,94	40,05	0,22	5,62	72,83

#### 4.1.2.2.2. Dimensionamiento

Para dimensionar el reactor de epoxidación, lo primero es saber el volumen que este necesite tener. Este volumen será el mismo que el del tanque de almacenamiento del ECSO ya que se considera que todo el aceite epoxidado saldrá del reactor para luego proceder a comercializarse. Por motivos de seguridad, se debe sobredimensionar dicho reactor un 20% respecto al caudal másico de salida. Para ello se utiliza la [ecuación 9](#).

$$V_{R-2} = V_{T-9} \cdot 1,2 \quad (9)$$

Donde:

- $V_{R-2}$ : Volumen del RDTA para la reacción de epoxidación (L).
- $V_{T-9}$ : Volumen tanque de almacenamiento MCSO (L).

Aplicando dicha ecuación se obtiene el volumen del RDTA:

$$V_{R-2} = 72,83 \text{ L} \cdot 1,2 = 87,4 \text{ L}$$

Una vez obtenido el volumen, es necesario suponer un valor de altura o radio. En este caso se supondrá un valor de altura de 1m ( $h_{R-2}$ ). Una vez esto se despeja el radio de la ecuación del volumen de un cilindro tal y como aparece en la [ecuación 10](#).

$$r_{R-2} = \sqrt{\frac{V_{R-2}}{\pi \cdot h_{R-2}}} \quad (10)$$

Aplicando dicha ecuación sabiendo que el diámetro es dos veces el radio:

$$\varnothing_{R-2} = 2 \cdot r_{R-2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,0874 \text{ m}^3}{\pi \cdot 1 \text{ m}}} = 0,33 \text{ m}$$

El reactor comercial elegido, posee 100 L de capacidad construido en acero inoxidable de alta presión ASIS 304 y 316.

Por otro lado, en cuanto a características del reactor elegido, éste es un reactor encamisado. Por dicha camiseta se introducirá tanto agua caliente para llegar a la temperatura de trabajo ideal como agua fría en caso de que se sobrepase dicha temperatura debido a la reacción exotérmica que se producirá. Tanto el agua fría como caliente, una vez sale del reactor, se recircula para seguir controlando la temperatura de trabajo.



#### 4. Estudio económico

El reactor consta de varios transmisores y controladores, tanto de temperatura, presión, nivel y caudal para evitar posibles errores en la entrada y salida de productos, así como en el volumen a tratar y la presión ejercida. En el [Apéndice 1](#) se muestra de manera más detallada un esquema del reactor de epoxidación con sus parámetros de control.

Por otro lado, se ha considerado un espesor del tanque de 3,5 mm debido a problemas de corrosión que puedan surgir y, en cuanto a la agitación, el tanque contiene un agitador mecánico el cual es adecuado para posibles fluctuaciones de presión.

En la [Tabla 12](#) se muestran las especificaciones del reactor comercial ([Figura 35](#)) las cuales se ajustan a la del reactor dimensionado.



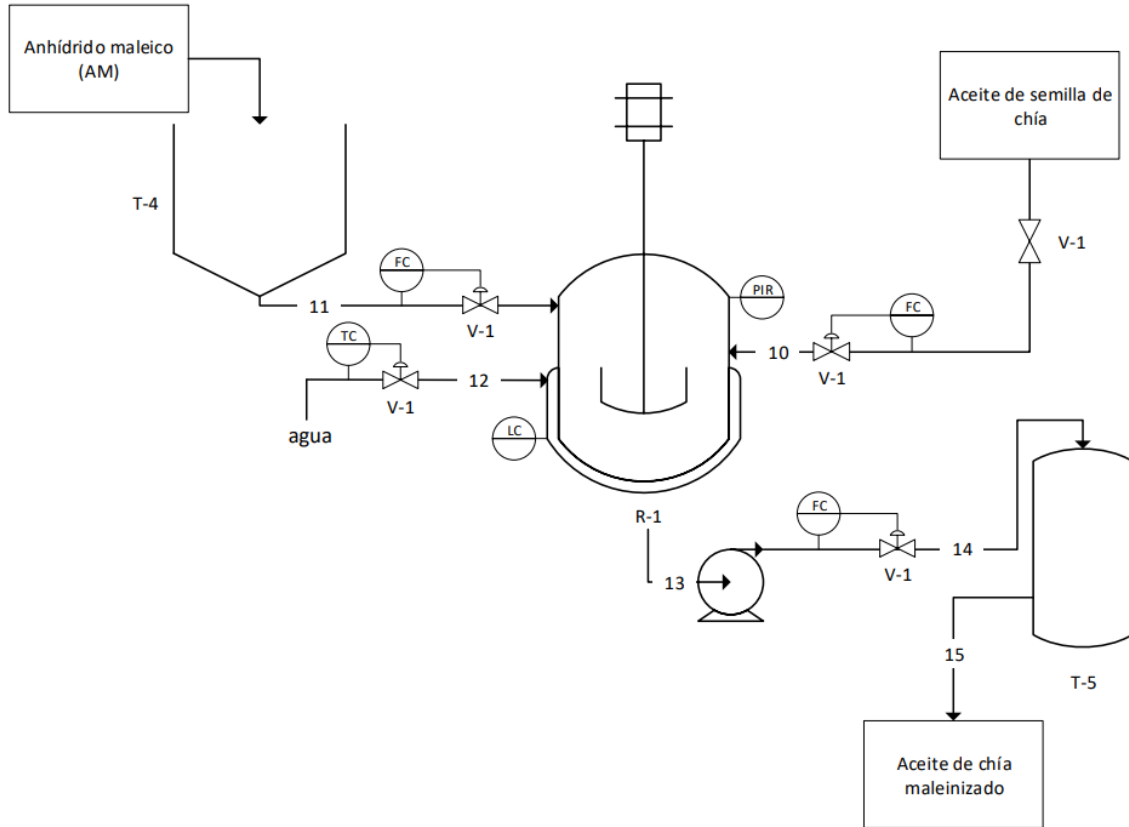
**Figura 35.** RDTA proceso epoxidación [59]

**Tabla 12.** Características generales RDTA epoxidación.

<b>Especificaciones R-2</b>	
Presión máxima (atm)	1,97
Temperatura máxima (°C)	350
Potencia máxima (kW)	75
Velocidad agitación (rpm)	500
<b>Dimensiones generales R-2</b>	
Diámetro interno (mm)	378
Diámetro equipo (mm)	381,5
Altura interna (mm)	1000
Altura equipo (mm)	2100
Volumen (L)	100
<b>Pesos R-2</b>	
Peso reactor (kg)	450

### 4.1.3. Etapa 3: Maleinización aceite de chía

A parte del proceso de epoxidación, cuando se obtiene el aceite de la semilla de chía, a éste se le realiza un proceso de maleinización que se representa en forma de diagrama de flujo en la [Figura 36](#). Este aceite maleinizado se comercializará como un endurecedor de origen renovable.



**Figura 36.** Proceso de obtención de aceite de chía maleinizado.

Donde:

- T-4: Silo de almacenamiento anhídrido maleico ( $C_2H_2(CO)_2O$ ).
- T-5: Tanque de almacenamiento agente reticulante, endurecedor.
- R-1: Reactor proceso de maleinización.

#### 4.1.3.1. Diseño del silo de almacenamiento de anhídrido maleico

El anhídrido maleico se almacena en un silo debido a que, a temperatura ambiente, éste se encuentra en estado sólido. Así, del silo cae por gravedad al reactor para empezar el proceso de maleinización.

Del proceso de maleinización, como se comentó anteriormente, se conoce, tras una búsqueda bibliográfica, que el anhídrido maleico (AM) se mezcla con el aceite de chía en un ratio molar de (2,3:1) [69]. Significa que, se introducirán 9 g de AM por cada 100 g de CSO. Sabiendo esto y que, de los 40,63 kg/día de aceite limpio, 15,63 kg/día entran al reactor para la maleinización, mediante la [ecuación 11](#) se obtiene la cantidad de AM que se necesita al día.

$$\dot{m}_{AM} = \dot{m}_{CSO_L\text{-maleinizado}} \cdot \frac{9}{100} \quad (11)$$

Donde:

- $\dot{m}_{AM}$ : Flujo másico del anhídrido maleico  $C_2H_2(CO)_2O$  (kg/día).
- $\dot{m}_{CSO_L\text{-maleinizado}}$ : Caudal aceite de chía limpio para maleinizar (kg/día).

Aplicando la ecuación:

$$\dot{m}_{AM} = 15,63 \text{ kg/día} \cdot \frac{9}{100} = 1,407 \text{ kg/día}$$

Una vez se tiene el flujo másico de AM, dividiendo dicho valor por su densidad, se obtiene el volumen que se utiliza al día:

$$V_{T-4} = \frac{1,407 \text{ kg/día}}{1,48 \text{ kg/L}} = 0,951 \text{ L/día}$$

Al igual que sucede con el  $H_2SO_4$ , el volumen es muy pequeño por lo que se considera que el silo deberá tener capacidad para almacenar AM durante 1 año (226 días laborales) por lo que el volumen final del silo es:

$$V_{T-4} = 0,951 \text{ L/día} \cdot 226 \text{ días} = 214,926 \text{ L}$$

En la [Tabla 13](#) se muestran las características y especificaciones del silo de almacenamiento comercial elegido ([Figura 37](#)). Asimismo, en el [Apéndice 1](#) aparecen el sistema de control que se emplea.



Figura 37. Silo almacenamiento AM [67].

Tabla 13. Características generales silo de almacenamiento AM.

<b>Especificaciones T-4</b>	
Capacidad por día (kg/día)	1,047
Volumen silo (L)	380
<b>Propiedades T-4</b>	
Altura (mm)	1120
Anchura (mm)	780
Longitud (mm)	1010

#### 4.1.3.2. Diseño del reactor de maleinización

En la etapa de epoxidación, el reactor se dimensionará siguiendo el mismo criterio empleado para el reactor en el proceso de epoxidación. La reacción de maleinización es otra de las etapas fundamentales ya que sirve para producir aceite de chía maleinizado (MCSO) el cual se comercializará como endurecedor para la formación del termoestable.

Este proceso se trabajará en discontinuo por lo que, de nuevo, se empleará un reactor discontinuo de tanque agitado (RDTA).

##### 4.1.3.2.1. Especificación de las corrientes

El reactor tiene dos corrientes de entrada y una de salida. De las de entrada, una es la entrada de aceite de chía y la otra la entrada de anhídrido maleico, en cuanto a la de salida, ésta es la del producto final, es decir, el aceite de chía maleinizado (MCSO). Es importante destacar que las pequeñas trazas de anhídrido maleico (AM) que puedan quedar tras el proceso se consideran despreciables y, por tanto, el MCSO no se someterá a ningún etapa de purificación, sino que directamente se envasará y comercializará.

Para un correcto dimensionamiento, se debe tener en cuenta, para calcular el volumen del reactor, el volumen de AM calculado previamente (0,951 L/día). La otra corriente de entrada, que corresponde al volumen de aceite limpio que se utiliza para el maleinizado, se puede obtener dividiendo el flujo másico de CSO (15,63 kg/día) por su densidad obteniendo el siguiente resultado:

$$V_{\text{CSO}_{\text{L maleinizado}}} = \frac{15,63 \text{ kg/día}}{0,928 \text{ kg/L}} = 16,84 \text{ L/día}$$

Con los volúmenes de ambas corrientes de entrada, se puede obtener, con una simple suma (ya que no se consideran pérdidas en el reactor), el volumen que pasará por la corriente de salida y llegará al tanque de almacenamiento del MCSO tal y como se muestra a continuación.

$$V_{\text{T-5}} = 16,84 \text{ L/día} + 0,951 \text{ L/día} = 17,8 \text{ L}$$

En la [Tabla 14](#) se muestra un resumen de las características y especificaciones de las corrientes de entrada y salida del reactor.

**Tabla 14.** Propiedades corrientes entrada y salida reactor de maleinización.

	<b>Corriente 10</b>	<b>Corriente 11</b>	<b>Corriente 13</b>
Fase	Líquido	Sólido	Líquido
Temperatura (°C)	20	20	220
Presión (atm)	1	1	1
Caudal (kg/día)	15,63	1,407	17,04
Volumen (L)	16,84	0,951	17,8

#### 4.1.3.2.2. Dimensionamiento

Para el dimensionamiento de este reactor, al igual que se hizo con el de epoxidación, se debe conocer el volumen que entra al reactor y que es el mismo que el volumen del tanque T-5 ya que, como se ha dicho previamente, no se consideran pérdidas. Por motivos de seguridad, el valor obtenido se tendrá que sobredimensionar en un 20% extra obteniendo la [ecuación 12](#).

$$V_{\text{R-1}} = V_{\text{T-5}} \cdot 1,2 \quad (12)$$

Donde:

- $V_{\text{R-1}}$ : Volumen del RDTA para la reacción de maleinización (L).
- $V_{\text{T-5}}$ : Volumen del tanque de almacenamiento de MCSO (L).

Aplicando dicha ecuación:

$$V_{R-1} = 17,8 \text{ L} \cdot 1,2 = 21,36 \text{ L}$$

Para obtener el diámetro y la altura una vez conocido el volumen, se siguen los mismos pasos que, con el reactor de epoxidación, por lo que se aplica nuevamente la [ecuación 10](#), teniendo en cuenta que el diámetro es dos veces el radio. En este caso, el valor de altura supuesto es de 0,5 m.

$$\phi_{R-1} = 2 \cdot r_{R-1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,02136 \text{ m}^3}{\pi \cdot 0,5 \text{ m}}} = 0,23 \text{ m}$$

En cuanto al reactor elegido comercialmente, es un reactor de 25 L encamisado con la misma función que el reactor de epoxidación. En cuanto al sistema de control, éste contiene los mismos controladores que el anterior y que aparecerán en el [Apéndice 1](#).

El diseño del tanque es completamente cerrado lo que provoca que la mezcla se encuentre en un medio estéril y no se contamine. Además, el tanque está fabricado en acero inoxidable 304, material con buenas propiedades fisicoquímicas y el espesor que presenta es de 3 mm para evitar problemas de corrosión.

Por último, contiene un agitador en forma de paleta con un motor para que la mezcla de los componentes se realice de forma efectiva. En la [Tabla 15](#) se muestran las propiedades de dicho reactor ([Figura 38](#)).



Figura 38. RDTA proceso maleinización [60].

Tabla 15. Características generales RDTA maleinización.

<b>Especificaciones R-1</b>	
Temperatura máxima (°C)	300
Potencia máxima (kW)	0,55
Velocidad agitación (rpm)	480
<b>Dimensiones generales R-1</b>	
Diámetro interno (mm)	230
Diámetro equipo (mm)	233
Altura interna (mm)	500
Altura equipo (mm)	1050
Volumen (L)	25

#### 4.1.4. Equipos de envasado

Los equipos de envasado tienen la función de envasar el producto en bolsas, botes, frascos, botellas, etc. En el presente trabajo se envasará el ESCO y MCSO en botes de aluminio. En la [Tabla 16](#) se muestran las características de la envasadora ([Figura 39](#)).



Figura 39. Envasadora [75].

Tabla 16. Especificaciones envasadora.

<b>Especificaciones Envasadora</b>	
Potencia (kW)	5
Caudal (L/min)	4,85
Peso a soportar (kg)	10
<b>Dimensiones envasadora</b>	
Altura (mm)	1372
Longitud (mm)	850
Anchura (mm)	450

### 4.1.5. Equipos globales en todo el proceso

En todo el proceso hay ciertos equipos que se repiten durante el transcurso de éste. Son equipos fundamentales para el transporte y regulación de los caudales de los productos.

#### 4.1.5.1. Bombas

Las bombas elegidas en todo el proceso son bombas centrífugas ya que éstas son capaces de transformar la energía mecánica en energía hidráulica y, de esta manera, poder mover y transportar la mayor cantidad de líquido posible.

La bomba que se ha elegido comercialmente ha sido una que puede abarcar un amplio rango de caudales ya que se utilizará la misma en todo el equipo. Además, debe tener un valor mínimo bastante bajo ya que algunas de las corrientes transportan muy poco caudal y volumen. En la [Tabla 17](#) se muestran sus características ([Figura 40](#)).



**Figura 40.** Bomba centrífuga [61].

**Tabla 17.** Características generales B-1.

<b>Especificaciones B-1</b>	
Modelo	MS 07
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	0,3-4,8
Presión de aspiración (mca)	5-36
Potencia (CV)	0,6



#### 4.1.5.2. Válvulas

Las válvulas elegidas en este caso son válvulas de bola debido a que para el proceso se requiera una rápida y fácil apertura, además de tener la menor pérdida de carga posible. Asimismo, éstas tienen que poder soportar ciertas presiones y temperaturas algo elevadas. En la [Tabla 18](#) se muestran las características de éstas ([Figura 41](#)).



**Figura 41.** Válvula de bola [62].

**Tabla 18.** Características generales V-1.

Especificaciones V-1	
Modelo	RS PRO
Material	Latón
Presión de trabajo (bar)	40
Rango temperaturas (°C)	-40/170

#### 4.1.5.3. Sensores

Para que el proceso, sobre todo en tanques y reactores, se lleve a cabo de manera controlada evitando pérdidas e incidentes, se utilizan una serie de sensores y controladores de caudal, nivel, temperatura y presión para así marcar unos límites y tener controlado el proceso en todo momento.

#### Controlador de temperatura



**Figura 42.** Controlador temperatura [63].

**Tabla 19.** Características TC.

Especificaciones TC	
Modelo	TM 55-1
Rango temperaturas (°C)	-70/600

### Controlador de caudal



Figura 43. Caudalímetro [64].

Tabla 20. Características FC.

Especificaciones FC	
Rango de medida (L/min)	5/100
Rango temperaturas (°C)	-10/90

### Controlador de nivel



Figura 44. Controlador de nivel [65].

Tabla 21. Características LC.

Especificaciones LC	
Rango de medida (L/min)	5/100
Rango temperaturas (°C)	-10/100

### Controlador de presión



Figura 45. Manómetro [66].

Tabla 22. Características PIR.

Especificaciones LPIR	
Rango de medida (L/min)	5/100
Rango Presión (bar)	0-10

## 4.2. Cronograma del proceso de producción

Una vez se han visto los pasos a realizar junto con el dimensionamiento y las especificaciones técnicas de los equipos a utilizar, se va a realizar un diagrama de Gantt, para así poder visualizar de manera esquemática el cronograma del proceso productivo del presente trabajo.

De esta manera, se podrá obtener información relevante como el tiempo de duración de cada operación y etapa del proceso, así como la duración total para establecer un horario de jornada laboral.

La jornada laboral se fijó en 10 h diarias, dentro de las cuales 1h son de descanso para los operarios, teniendo un margen para agotar dicho tiempo de 13:00 a 15:00. Este descanso no repercute en el proceso de producción debido a que, a las 13:00 ya habrá empezado el proceso de epoxidación y maleinización por lo que los operarios se turnarán la hora de descanso en dos grupos (primer grupo de 13:00-14:00 y segundo grupo de 14:00 a 15:00) para no dejar descuidada la planta mientras se realizan las reacciones y, acabando su jornada laboral a las 18:00.

El proceso de producción y envasado de los productos para su comercialización se realiza dentro del horario fijado, cumpliendo así la producción de 51,76 kg día.

En primer lugar, el llenado de los tanques se estima en que durará, unos 5 minutos para llenar el tanque de cada reactivo y unos 10 minutos para llenar el silo de aceite de chía tal y como se muestra en la [Tabla 23](#). Como se realiza el llenado a la vez, el tiempo máximo que se consume es de 10 minutos.

**Tabla 23.** Tiempo llenado de tanques de almacenamiento.

	<b>Silo de CSO</b>	<b>Tanque H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	<b>Tanque CH<sub>3</sub>COOH</b>	<b>Tanque H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	<b>Silo de AM</b>
Cantidad por día	842,4 kg	57,42 L	28,11 L	200,23 L	367,15 kg
Tiempo (min)	10	3	3	5	7
Tiempo usado (min)	10				

#### 4. Estudio económico

En cuanto al proceso de extrusión, centrífuga y almacenamiento del aceite de chía, según las especificaciones de los equipos comerciales como los 160 kg/h de producción de la extrusora y a los 3 l/min de la centrífuga, se obtienen los siguientes tiempos representados en la [Tabla 24](#).

**Tabla 24.** Tiempo proceso obtención aceite de chía limpio.

	<b>Extrusión</b>	<b>Centrifugado</b>	<b>Almacenamiento CSO<sub>L</sub></b>
Cantidad (kg/día)	168,48	41,21	40,63
Tiempo (min)	65	13,7	5
Tiempo usado (min)	83,7		

Por último, en las reacciones de epoxidación y maleinización, almacenamiento y envasado de cada producto por separado, se obtienen los tiempos que marca la [Tabla 25](#).

**Tabla 25.** Tiempo estimado obtención resina epoxidada y maleinizada.

	<b>Proceso de epoxidación</b>		
	<b>Reacción epoxidación</b>	<b>Almacenamiento ECSO</b>	<b>Envasado ECSO</b>
Cantidad (L/día)	72,83	72,83	72,83
Tiempo (min)	480	10	15
	<b>Proceso de maleinización</b>		
	<b>Reacción maleinización</b>	<b>Almacenamiento MCSO</b>	<b>Envasado MCSO</b>
Cantidad (L/día)	17,8	17,8	17,8
Tiempo (min)	180	5	10
Tiempo usado (min)	505		

Una vez visto los tiempo y clasificado las diferentes operaciones se realiza el diagrama de Gantt representado en la [Figura 46](#) donde se observa, en rojo, la ruta crítica del proceso, es decir, los procesos que no deben retrasarse para que salga correctamente.

#### 4. Estudio económico

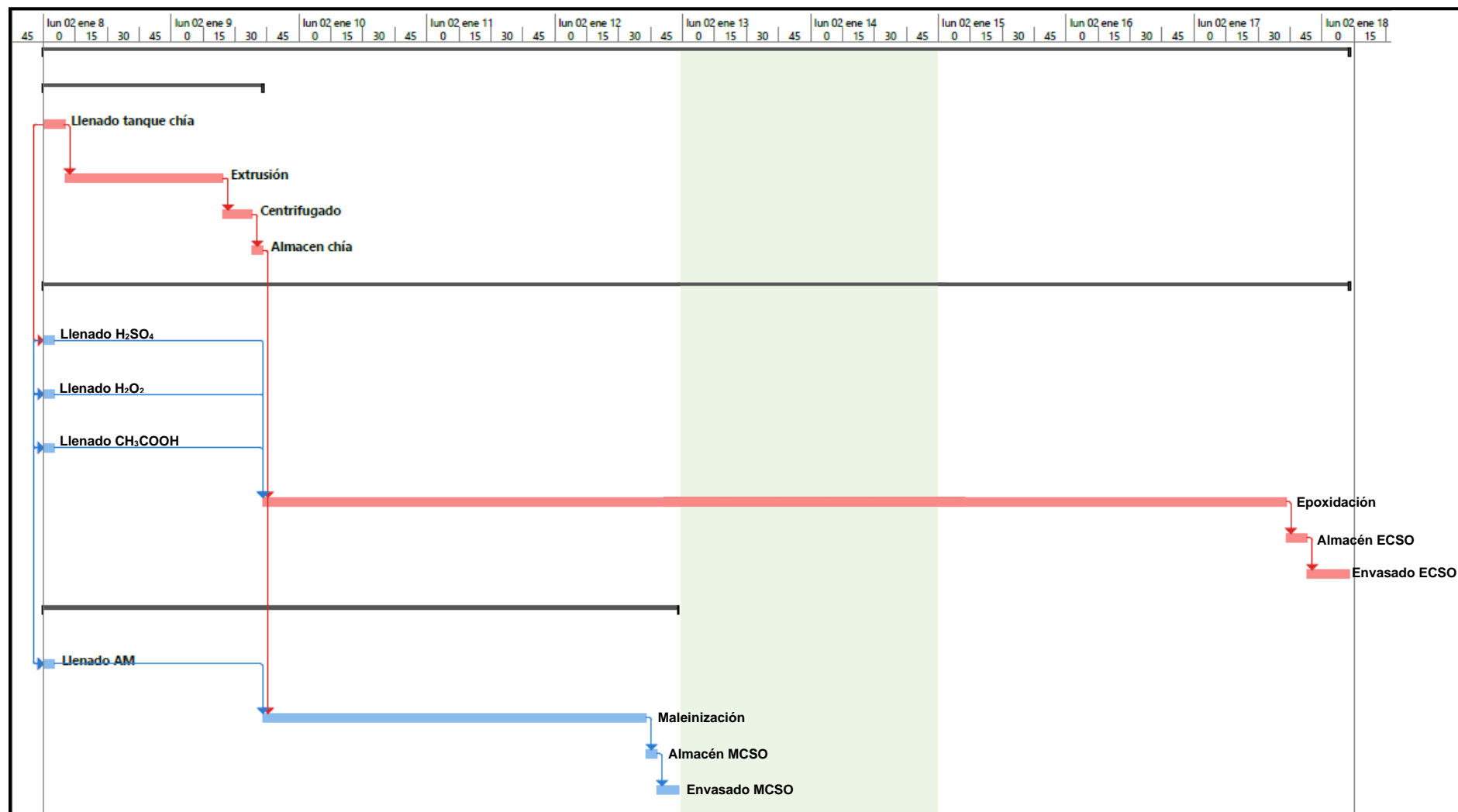


Figura 46. Diagrama de Gantt del proceso de producción de resina epoxidada y maleinizada a nivel industrial. Adaptado con " Project 2016".

### 4.3. Estudio viabilidad económica

El último apartado de este punto constará de un análisis o estudio de la viabilidad económica de la planta de producción de aceite de chía epoxidado (matriz polimérica) y maleinizado (endurecedor de origen bio) para, junto con un endurecedor de origen petroquímico (MNA) y un acelerador (1-metilimidazol) obtenidos directamente de manera comercial, exportar al mercado estos productos en un kit para poder formar un polímero termoestable con diferente aplicabilidad tanto en sectores industriales como productos de uso común.

Para ello, se deberá calcular el coste de los materiales y reactivos junto con las cantidades a utilizar de cada uno, el coste de los equipos empleados tanto en producción como en envasado de los productos, coste del consumo energético, del personal de trabajo y de la planta industrial elegida para la instalación de equipos.

Finalmente se evaluará la rentabilidad con el fin de conocer la amortización del proyecto y poder así, conocer el beneficio que genera dicho proceso productivo.

Antes de empezar el análisis económico, hay que tener en cuenta que, de los 365 días que tiene un año, en España hay 105 días de fin de semana, 14 días festivos y 20 días que se les otorga de vacaciones a los operarios haciendo eso un total de 226 días laborales al año.

#### 4.3.1. Presupuesto materiales y reactivos

Anteriormente se ha calculado la cantidad de materiales y reactivos que se deben utilizar al día y los que se almacenarán hasta llenar los tanques y silos de almacenamiento. Con dichos datos y buscando los precios comerciales de dichos materiales se puede calcular el coste de cada uno de ellos y, en consecuencia, el coste total tal y como se ve reflejado en la [Tabla 26](#).

Por otro lado, hay que tener en cuenta un factor importante ya que se debe saber cuánta cantidad de agua se deberá introducir a las camisas de los rectores de epoxidación y maleinización (tanto agua como vapor de agua).

Para realizar dicho cálculo, se tiene en cuenta el área de la camisa del reactor, mostrada en la [ecuación 13](#), y el perímetro calculado según muestra la [ecuación 14](#).

$$\text{Área} = \text{Perímetro} \cdot h \quad (13)$$

$$\text{Perímetro} = \pi \cdot D \quad (14)$$

Donde:

- h: Altura (m)
- D: Diámetro (m)

#### 4.3.1.1. Volumen de agua para el reactor de epoxidación

Aplicando dichas ecuaciones se obtiene, para el reactor de epoxidación:

$$\text{Perímetro} = \pi \cdot 0,378\text{m} = 1,19\text{m}$$

$$\text{Área} = 1,19\text{m} \cdot 1\text{m} = 1,19\text{m}^2$$

Como se ha visto en apartados anteriores, el espesor del reactor de epoxidación, que equivalía al espesor de la camisa, es de 3,5 mm. Por tanto, la cantidad de agua necesaria para llenar la camisa es:

$$1,19\text{m} \cdot 0,0035 = 0,004165 \text{ m}^3 = 4,165 \text{ dm}^3$$

Debido a que el agua se recircula para volver a entrar al tanque, ésta solo se cambiará una vez finalizado el día laboral, por lo que la cantidad de agua invertida al año para calentar o refrigerar el reactor de epoxidación es de:

$$4,165 \text{ dm}^3/\text{día} \cdot 226 \text{ días} = 941,29 \text{ dm}^3/\text{año}$$

#### 4.3.1.2. Volumen de agua para el reactor de maleinización

Aplicando y combinando las ecuaciones 13 y 14 y siguiendo el mismo procedimiento que en el reactor de epoxidación cambiando las dimensiones y espesores. Se obtiene el volumen de agua utilizado al día y al año en el reactor de maleinización.

$$\text{Área} = \pi \cdot 0,230\text{m} \cdot 0,5\text{m} = 0,3613\text{m}^2$$

$$0,3613\text{m}^2 \cdot 0,003\text{m} = 0,001084\text{m}^3 = 1,084\text{dm}^3$$

$$1,084 \text{ dm}^3/\text{día} \cdot 226 \text{ días} = 244,98 \text{ dm}^3/\text{año}$$

En la [Tabla 26](#), se muestran las cantidades diarias y anuales que se van a utilizar para cada material, así como el coste del kg o L de producto y el coste anual para, de esta forma, conocer el coste total anual que se supondrán dichos materiales. Se debe tener en cuenta que, debido a la gran cantidad de aceite de chía y que el proyecto está previsto mínimo para 15 años, el proveedor ejerció un descuento de venta al por mayor del 15% en la compra del aceite de chía pasando de 163.728,86 € iniciales a 139,169,53€

**Tabla 26.** Cantidades y costes de materiales y reactivos

<b>Material</b>	<b>Cantidad (kg o L/día)</b>	<b>Cantidad anual (kg o L/año)</b>	<b>Coste (€/kg o L)</b>	<b>Coste anual (€/año)</b>
Semilla de chía (kg)	168,48	38076,48	4,30 €	139.169,53
Anhídrido maleico (kg)	1,41	317,91	15,00 €	4.768,71
Ácido sulfúrico (L)	0,22	49,72	7,26 €	360,97
Ácido acético (L)	5,62	1270,60	8,77 €	11.143,15
Peróxido hidrógeno (L)	40,05	9050,37	1,40 €	12.670,51
Agua epoxidación (L)	4,165	941,29	0,00131	1,23
Agua maleinizado (L)	1,084	244,98	0,00131	0,32
<b>Coste total materiales y reactivos</b>				<b>168.144,43€</b>

### 4.3.2. Presupuesto equipos

Para el presupuesto de los equipos, se va a realizar una clasificación de estos para poder observar de manera más intuitiva los precios unitarios y totales.

En primer lugar, comenzando con los equipos de almacenamiento, se encuentran los tanques y silos que almacenan la semilla y el aceite de chía, los diferentes reactivos para epoxidar y maleinizar el aceite, y dicho aceite epoxidado y maleinizado listo para comercializar.

En la [Tabla 27](#) se muestra el volumen de cada tanque, el cual se indicó y cálculo en el apartado de dimensionamiento. Además, se mostrarán las unidades de cada uno de estos y el precio total en caso de necesitar más de un equipo.



**Tabla 27.** Costes equipos de almacenamiento

<b>Equipos de almacenamiento</b>	<b>Volumen (L)</b>	<b>Unidades</b>	<b>Coste total (€)</b>
Silo semilla de chía	1000	1	1.640,00
Silo AM	380	1	1.257,55
Tanque residuo sólido	310	1	439,44
Tanque aceite chía limpio	50	1	169,87
Tanque H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	75	1	254,74
Tanque H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	210	1	378,81
Tanque CH <sub>3</sub> COOH	30	1	101,92
Tanque ECSO	100	1	274,74
Tanque MCSO	30	1	101,92
Coste total equipos de almacenamiento			4.618,99 €

Seguidamente, se continúa con los costes de los equipos encargados de realizar el proceso productivo y envasado del producto final. Tales como la extrusora, centrífuga, reactores, y máquinas de envasado.

Cabe destacar que, aunque sí que se proporciona de máquinas de envasado, no habrá, de igual forma, para el empaquetado. Esto es debido a que la producción que se ha estimado no es muy elevada y una o dos máquinas adicionales para empaquetar los envases supondría un elevado coste adicional innecesario ya que es factible que los propios operarios empaqueten los productos ya que, como se ha comentado, la cantidad al día de producción no es excesiva.

En la [Tabla 28](#) se muestran los equipos utilizados, con las unidades necesarias en cada uno, el coste por unidad y el coste total de cada equipo, así como el coste global de todos.

**Tabla 28.** Costes equipos de producción.

<b>Equipos de producción</b>	<b>Unidades</b>	<b>Coste unitario (€/ud)</b>	<b>Coste total (€)</b>
Extrusora	1	2.750,00	2.750,00
Separadora centrífuga	1	2.637,80	2.637,80
Reactor epoxidación	1	4.600,00	4.600,00
Reactor de maleinizado	1	1.430,00	1.430,00
Envasadora	2	11.800	23.600
Coste total equipos de producción			35.017,80 €

Por último, se analizarán los costes de los equipos auxiliares. Por este tipo de equipos, se entienden aquellos que facilitan el proceso de producción y ayudan a que parámetros como el caudal, la temperatura, el volumen, la presión e incluso el transporte de fluidos sean los adecuados.

En la [Tabla 29](#) se encuentran las unidades empleadas, el coste unitario y total de cada producto y el coste total de todos estos equipos auxiliares.

**Tabla 29.** Costes equipos auxiliares

<b>Equipos auxiliares</b>	<b>Unidades</b>	<b>Coste unitario (€/ud)</b>	<b>Coste total (€)</b>
Válvulas	15	12,84	192,60 €
Bombas	8	256,00	2.048,00 €
Termómetro	2	166,43	1.142,24
Caudalímetro	12	340,01	58,08
Controlador de nivel	2	571,12	332,86
Manómetro	2	29,04	4.080,12
Coste total equipos auxiliares			7.853,90 €

### 4.3.3. Presupuesto planta industrial

Para distribuir correctamente los diferentes equipos descritos anteriormente, es necesario disponer de una planta o nave industrial. Para ello, será necesario que la planta industrial contenga elementos imprescindibles, como un espacio adecuado para poder colocar todos los equipos descritos anteriormente. Además, debe tener un espacio para descargar las materias primas periódicamente, así como disponer de oficinas donde trabajen los operarios e ingenieros de la planta.

Es por eso, que la nave industrial elegida contiene 600 m<sup>2</sup>, ésta contiene una zona de oficinas en el interior de la nave de 30 m<sup>2</sup> y un patio privado de 300m<sup>2</sup>. En cuanto a características más específicas, La nave es una estructura totalmente metálica y parcialmente ignifugada, también contiene tres puntos de alumbrado de emergencia de 300 lúmenes (27W). En cuanto a la iluminación, viene incorporada con luminaria tipo campana LED de 200 W, en concreto 12. Estas campanas están conectadas a dos cables electrificados “trunking” de 50 m cada uno.

Tanto la energía de los equipos como de la iluminación de la nave está agrupada en un cuadro general que contiene 3 diferencias a modo de prevención en caso de que alguno de ellos saltara debido a algún problema en los equipos. Por otro lado, se dispone de un cuadro secundario que se utiliza para conectar algún aparato eléctrico que sirva de ayuda a los operarios durante el proceso.

Con todo lo nombrado anteriormente, el precio de la nave es de 209.000 €. En la [Figura 47](#) se muestra la nave escogida desde el interior.



**Figura 47.** Nave industrial elegida para instalar la planta. Adaptado de [76].

#### 4.3.4. Presupuesto consumo energético

Para saber cuál es el consumo energético que se realiza a nivel global, se debe tener en cuenta, en primer lugar, el consumo de potencia que generan los equipos en función de las horas al día que esté trabajando.

En la [Tabla 30](#) se muestra la potencia por unidad de los equipos, así como la potencia total según la repetición de unidades de alguno de los equipos.

**Tabla 30.** Relación de potencia de los diferentes equipos de la planta

<b>Equipo</b>	<b>Potencia unidad (kW)</b>	<b>unidades</b>	<b>Potencia total (kW)</b>
Extrusora	3	1	3
Separadora centrífuga	0,04	1	0,04
Reactor epoxidación	2,2	1	2,2
Reactor de maleinizado	0,55	1	0,55
Bombas	0,447	8	3,576
Máquina de envasado	5	2	10

Como se han tenido en cuenta todos los equipos, incluso aquellos que se repiten, las horas de trabajo se contarán solamente para un equipo. Por ejemplo, aunque tengamos 8 bombas, si cada una tarda 2 minutos en impulsar el fluido. En la columna de tiempo se pondrán 2 minutos y no 2 minutos por 8 bombas ya que esas 8 bombas ya se tienen en cuenta en el apartado de “Potencia total” de la tabla anterior.

En la [Tabla 31](#) se muestran los valores de potencia diaria en kWh según las horas de funcionamiento diarias de los equipos, así como la potencia total diaria consumida por los equipos.

Tabla 31. Potencia diaria equipos

Equipo	Tiempo funcionamiento (h)	Potencia diaria (kW día)
Extrusora	1,05	3,15
Separadora centrífuga	0,23	0,00915
Reactor epoxidación	8	17,6
Reactor de maleinizado	3	1,65
Bombas	0,033	0,118
Máquina de envasado	0,25	2,0833
Potencia diaria total equipos		24,91 kW día

Una vez sabida la potencia de los equipos, se debe calcular el consumo provocado por la iluminación de la nave en la cual se incluirán tanto las lámparas de campana como los focos de emergencia. Al igual que se ha realizado con los equipos, se considerará la potencia de los focos de iluminación y de emergencia totales contando los que estén repetidos y el tiempo de consumo se contabilizará de un foco y lámpara solamente.

Material	Consumo total (kW)	Tiempo funcionamiento (h)	Consumo diario (kW día)
Campana LED	2,4	10	24
Luz emergencia	0,081	24	1,944
Potencia diaria total material iluminación			25,944 kW día

Por tanto, visto la potencia total de equipos y máquinas, se conoce que el consumo y potencia totales de los diferentes equipos de producción y de iluminación son:

$$\text{Consumo total} = 25,03\text{kW día} + 25,944\text{kW día} = 50,853 \text{ kW día}$$

Una vez conocido el consumo total, se va a para a realizar el estudio económico de este, para ello se han comparado diferentes tipos de tarifas y, finalmente, se ha elegido la tarifa de luz de la compañía “Repsol” debido a que, independientemente de la tarifa que se contrate, los precios no serán variables [70].

En la [Tabla 32](#) se muestran los precios de la tarifa contratada que, en este caso, al ser independiente del precio de potencia y consumo, se han contratado 55 kW debido a que abarca de sobra los 50,853 kW que se van a consumir al día.

**Tabla 32.** Precios tarifa compañía eléctrica

<b>Periodo</b>	<b>Precio potencia (€/kW día)</b>	<b>Precio energía (€/kW h)</b>
Valle	0,0031	0,2356
Llano	0,0717	0,2774
Punta	0,0717	0,3310

En esta tarifa, el periodo valle, llano y punta tienen una duración de 8 h cada uno alrededor de todo el día. Sabiendo la potencia a contratar, los precios de la compañía y el consumo de la planta calculado previamente, se puede calcular el coste total del consumo energético en toda la nave.

En la [Tabla 33](#), se muestra el coste total calculado en cuanto a los precios y consumo de potencia, en base a los 55kW contratados.

**Tabla 33.** Precios potencia fija contratada.

<b>Periodo</b>	<b>Potencia contratada (kW)</b>	<b>Precio potencia/año (€/kW año)</b>	<b>Precio fijo/año</b>
Valle	55	0,7006	38,53
Llano	55	16,204	891,23
Punta	55	16,204	891,23
Precio total potencia contratada al año			1.821,00 €

Una vez se tienen los costes de potencia, se calculan los precios de consumo de energía los cuales varía según la energía que uses, en este caso 50,853 kW día.

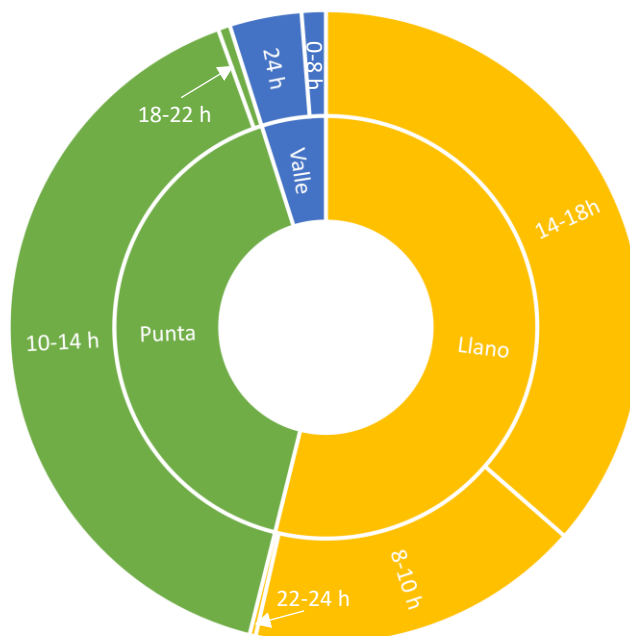
Sin embargo, hay que tener en cuenta que, aunque se consuman a lo largo del día, cerca de 51 kW, no en todo el día se consume lo mismo ya que, al trabajar en discontinuo, una vez el equipo realiza su función, deja de funcionar y de consumir.

Las horas de los diferentes periodos de la tarifa, junto al consumo de potencia y energía según el tiempo de funcionamiento de los equipos y de la iluminación se ven resumidos en la [Tabla 34](#).

**Tabla 34.** Producción por horas según el periodo de precios.

Periodo	Tiempo	Consumo día (kW)		Consumo año (kW)
Llano	8-10 h	Extrusora (65 min)	3,15	711,90
		Centrifugadora (13,73 min)	0,00915	2,07
		R Epoxidación (20 min)	0,733	165,73
		R. Maleinización (20 min)	0,183	41,43
	14-18 h	R. Epoxidación (220 min)	8,067	1823,07
		Envasado ECSO (15 min)	1,25	282,50
Punta	10-14 h	R Epoxidación (240 min)	8,8	1988,80
		R. Maleinización (160 min)	1,47	331,47
		Envasado MCSO (10 min)	1,250	282,50
Consumo total energía equipos			24,91	5629,45 kW año
Valle	0-8 h	Emergencia entre semana	0,648	146,448
	0-24 h	Emergencia fines y festivos	1,944	204,12
Llano	8-10 h	Emergencia entre semana	0,162	36,612
		Campanas LED	4,8	1084,8
	14-18 h	Emergencia entre semana	0,324	73,224
		Campanas LED	9,6	2169,6
	22-24 h	Emergencia entre semana	0,162	36,612
	Punta	10-14 h	Emergencia entre semana	0,324
Campanas LED			9,6	2169,6
18-22 h		Emergencia entre semana	0,324	73,224
Consumo total energía iluminación			27,888	6067,46 kW año

Para observar de mejor manera estos datos, se han representado gráficamente obteniendo así la [Figura 48](#). En ella se observan como está distribuido el consumo de energía de la planta repartida en las diferentes fases que ofrece la tarifa. Todo ello siguiendo las horas de trabajo estipuladas desde un principio.



**Figura 48.** Distribución horas y consumo energético de equipos e iluminación. Formato 24 h.

Una vez desarrollado esta apartado, ya se pueden obtener los costes finales del consumo energético (variable) total como se observa en la [Tabla 35](#).

**Tabla 35.** Precios energía consumida

Periodo	Potencia consumida (kW)	Precio energía (€/kW h)	Precio energía anual (€/año)
Valle	2,592	0,2356	1803,93
Llano	28,440	0,2774	14263,77
Punta	21,765	0,3310	13025,22
Precio total energía consumida al año			29.092,93 €

Una vez conocido el precio de la potencia al año (según la contratada) y de la energía consumida, con una suma se puede saber el coste energético total al año.

$$1.821,00 \text{ €/año} + 23.092,93 \text{ €/año} = 30.913,93 \text{ €/año}$$



### 4.3.5. Presupuesto personal

Para poder controlar y llevar a cabo de forma correcta y segura el proceso, tanto productivo como el de envasado y empaquetado, es necesaria la contratación de personal especializado para realizar dichas funciones.

En concreto, se van a necesitar cuatro empleados, tres operarios los cuales realizarán la mayoría de las operaciones ya que estos deberán tener un conocimiento básico de los procesos que se producirán y equipo empleado, además de las operaciones de empaquetado de las muestras ya envasadas. Por otro lado, se dispondrá de un ingeniero químico que se encargará de supervisar el trabajo de los operarios y de asegurarse que los respectivos controladores funcionan correctamente para asegurarse de que el proceso está funcionando correctamente.

Siguiendo el BOE 12038. “Resolución de 7 de julio de 2021, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el XX Convenio colectivo general de la industria química” [71], se obtendrán los salarios brutos de los empleados tal y como se muestra en la [Tabla 36](#).

**Tabla 36.** Coste anual personal empleado

Empleado	Salario individual (€/año)	Nº empleados	Salario total (€/año)
Operario	17.678,17	3	53.034,51
Ingeniero Químico	21.312,97	1	21.312,97
Coste total salarios anuales empleados			74.347,48 €/año

### 4.3.6. Presupuesto total

Una vez se han calculado todos los costes de material para la producción, coste energético, salario empleados, nave industrial, etc. Se puede obtener ya el coste total, la inversión inicial que se debe realizar para poner en marcha dicho proyecto.

Se debe tener en cuenta que, además de los materiales para la obtención de la resina epoxidada y maleinizada, se deben añadir a los costes, tanto el endurecedor petroquímico (MNA) como el acelerador (imidazol) los cuales no fueron añadidos junto con los otros materiales ya que estos no se producen, se compran y se comercializan.

En la **Tabla 37** se muestra un desglose de los costes totales vistos previamente y del coste total de la inversión inicial que se deberá realizar el primer año.

**Tabla 37.** Coste total de inversión.

<b>Motivo inversión</b>	<b>Coste (€/año)</b>
Materiales de producción	168.144,43
MNA	19.436,68
Imidazol	1.720,42
Equipos	47.490,69
Planta industrial	209.000,00
Coste energético	23.312,45
Salario empleados	74.347,48
<b>Coste total inversión</b>	<b>543.452,15 €/año</b>

### **4.3.7. Rentabilidad**

Una vez se han obtenido todos los costes, se debe conocer que beneficios se obtendrán, que precio mínimo tendrá el producto y que ventajas y desventajas en cuanto a costes y características tendrá el producto frente a las resinas epoxy y endurecedores de origen petroquímico que se compararon mecánicamente en apartados anteriores. Para ello, se deben seguir una serie de pasos de que expondrán a continuación.

#### **4.3.7.1. Parámetros previos para obtener la rentabilidad**

##### **Coste total del capital inmovilizado**

En primer lugar, se debe conocer el capital inmovilizado de la planta. Éste sirve para estimar el coste que tendrá que invertirse en la adquisición de aquellos elementos que conformen dicho capital.

En este caso, el capital inmovilizado está formado por los elementos que se describen en la [Tabla 38](#) y que hay que tener muy en cuenta para obtener un valor lo más exacto posible.

**Tabla 38.** Parámetros para el cálculo del CI

Capital físico o primario (CP)	€ equipos + € nave	256.353,340 €
Proyección y dirección del montaje (DM)	0,3 · € equipos	14.206,002 €
Capital directo (CD)	CP · DM	270.559,342 €
Contratistas (C)	0,04 · CD	10.822,374 €
Gastos no previstos (GNP)	0,2 · CD	54.111,868 €

Con estos, datos se utiliza la [ecuación 15](#) para calcular el capital inmovilizado.

$$CI = CD + C + GNP \quad (15)$$

Aplicando dicha ecuación:

$$CI = 270.559,342 \text{ €} + 10.822,374 \text{ €} + 54.111,868 \text{ €} = 335.493,58 \text{ €}$$

#### **Capital circulante (CC)**

El capital circulante corresponde a los bienes de consumo que intervienen en el proceso productivo. Es decir, consumo de materias primas, mensualidad de los trabajadores, obtención del producto, etc. Se considera que este capital supone entre un 10 y un 30% del valor de CI por lo que se tomará un valor medio del 20% tal y como se muestra en la [ecuación 16](#).

$$CC = 0,2 \cdot CI \quad (16)$$

Aplicando la ecuación anterior:

$$CC = 0,2 \cdot 335.493,58 \text{ €} = 67.098,72 \text{ €}$$

### **Inversión total inicial**

Una vez conocidos los valores de CI y CC, se puede calcular cual es la inversión inicial necesaria para que pueda empezar el proyecto. Para ello, se sigue la [ecuación 17](#).

$$I_0 = CI + CC \quad (17)$$

Aplicando dicha ecuación:

$$I_0 = 335.493,58 \text{ €} + 67.098,72 \text{ €} = 402.592,30 \text{ €}$$

#### **4.3.7.2. Parámetros clave para la obtención de la rentabilidad**

Una vez calculados los parámetros anteriores, se fija el objetivo de obtener el coste mínimo del producto para que, en 15 años la planta industrial no tenga pérdidas, es decir, que el valor actual neto (VAN) será 0 y, a continuación, calcular el valor de la tasa interna de retorno (TIR) para saber el porcentaje de ingresos que se obtiene.

Antes de calcular tanto el VAN como el TIR, se realizará un estudio del flujo neto de caja, donde se tendrán en cuenta los ingresos, costes, amortización y beneficio.

### **Flujo neto de caja (CF<sub>t</sub>)**

Como se ha comentado, para calcular el flujo neto de caja se deberán tener en cuenta ciertos parámetros que se ven representados en la [ecuación 18](#).

$$CF_t = \text{Beneficio neto} + \text{amortización} \quad (18)$$

Para calcular el beneficio neto y las amortizaciones se deben seguir una serie de pasos que se mostrarán a continuación:

- 1) Se introducen los ingresos y costes de los próximos 15 años. En los ingresos, se supone un precio inicial de venta del producto 55 €/kg. En los costes se introducen los gastos generados (materias primas, equipo, nave, consumo energético, etc.).
- 2) Para obtener los datos de los años posteriores se debe aplicar una relación de IPC (Índice de Precios y consumos) del 8,7% [72] siguiendo la [ecuación 19](#). Esto se realiza ya que todos los años, el precio de los productos no se mantiene constante.

$$\text{€}_{\text{año}_i} = \text{€}_{\text{año}_{i-1}} \cdot (1 + \text{IPC}) \quad (19)$$

- 3) Obtenidos los ingresos y costes en un periodo de 15 años, se calcula la amortización para cada año. Ésta refleja la devaluación de los equipos e instalaciones por lo que a medida que pase el tiempo, tendrá un menor valor. Para su cálculo se emplea la [ecuación 20](#).

$$\text{Amortización} = \text{CI} \cdot r \cdot (1 - r)^{n-r} \quad (20)$$

Donde:

- CI: Capital inmovilizado (€).
- r: Tasa de amortización (€). [Ecuación 21](#).

$$r = 1 - \left(\frac{R}{\text{CI}}\right)^{1/t} \quad (21)$$

- R: Valor residual (Se considera el 1% del CI) (€).
- t: Periodo de amortización (15 años).
- n: Año del cálculo (años)

- 4) Sabiendo todo esto, con la [ecuación 22](#) y la [ecuación 23](#) se puede calcular el beneficio bruto y neto para cada año.

$$\text{Beneficio}_{\text{bruto}} = \text{Ingreso} - \text{costes} - \text{amortización} \quad (22)$$

$$\text{Beneficio}_{\text{neto}} = \text{Beneficio}_{\text{bruto}} \cdot (1 - \text{IS}) \quad (23)$$

Donde:

- IS: Impuesto de sociedades (15%).

- 5) Como ya se tiene el beneficio neto y la amortización, se puede calcular finalmente el flujo neto de caja siguiendo la [ecuación 18](#) y, en consecuencia, se podrá calcular el VAN y el TIR.

#### **Cálculo del VAN**

El VAN es un método que sirve para determinar la viabilidad del proyecto. Si tras medir los flujos de futuros ingresos y descontar la inversión inicial queda alguna ganancia, el proyecto es viable. Para calcularlo, se utiliza la [ecuación 24](#).

$$VAN = -I_0 + \sum_t \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (24)$$

Donde:

- VAN: Valor actual neto estimado futuro de la actividad (€).
- $CF_t$ : Flujo neto de caja en el año t (€).
- i: Tipo de interés actual (10%).
- t: Tiempo de vida útil de la planta (años).

Aplicando dicha ecuación, el valor del VAN, habiendo supuesto un precio de producto de 55 €/kg, es de 694.688,57 €. Mediante una interpolación se obtiene que el precio de venta mínimo para que no haya pérdidas en un periodo de 15 años, es decir, el precio que provoca que el VAN sea igual a 0, es de 49,44 €/kg de producto.

### **Cálculo del TIR**

El TIR es la rentabilidad que ofrece la inversión. Es decir, el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá la inversión. A mayor TIR, mejor será la inversión.

También es considerado como el valor de la tasa de descuento que hace que el VAN ser igual a 0. Por ello, se aplica la [ecuación 25](#) para saber cuál es el valor de TIR para que el VAN haya dado 0.

$$0 = -I_0 + \sum_t \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (25)$$

Donde:

- i: Tipo de interés para que el VAN sea nulo, TIR (%).

El resultado del TIR en este caso es del 10%. Por tanto, estos son los valores de VAN y TIR para que no haya beneficios, pero tampoco pérdidas.

### **4.3.8. Análisis de los resultados**

Una vez obtenidos los resultados del precio mínimo del producto a vender, se va a comparar de nuevo con el mismo conjunto de resina epoxy + endurecedor comerciales y 100% de origen petroquímico con el que compararon las propiedades mecánicas en el [apartado 3.4.3](#) pero, esta vez, desde el punto de vista económico y comercial.

En primer lugar, es posible que el precio de partida del producto final sea bastante elevado, ya que, si se quisieran obtener beneficios, el precio debería rondar los 50 €/kg.

Sin embargo, comparado con los packs 100% petroquímicos de resina epoxy + endurecedor, el precio no es tan descabellado.

Cabe recordar que la resina elegida para la planta de producción fue la que tenía un ratio MCSO 50:50 MNA y con una matriz polimérica formada 100% por ECSO, lo cual le otorgaba un 78,5% de composición bio.

La resina “WWAS/WWB4”, uno de los dos kits que se compararon [73], tiene un precio de 40,54 €/kg, la diferencia entre la resina formada en este proyecto y la comercial es de algo menos de 10 € y de menos de 15 € suponiendo los 55 €/kg. Ciertamente es que el pack petroquímico proporciona una dureza el doble de mayor, pero en contrapartida su resistencia al impacto es mucho menor y tiene un 0% de composición bio lo cual es un problema cada vez mayor en la sociedad y en las industrias.

En cuanto al segundo pack que se comparó proveniente “MP advanced” [74], tiene un precio de 118,16 €/kg, lo cual es más del doble del fijado en el producto final de este proyecto y, aunque es cierto que tiene mejores propiedades resistentes, su resistencia al impacto es menor y su % bio es nulo.

Por tanto, comparando los precios de ambas partes, se observa que, aunque el producto bio pueda ser más caro que algunos de origen petroquímico, la diferencia no es muy amplia (incluso menor en algunos casos) y el tener un elevado porcentaje de su composición de origen renovable lo hacen un producto de gran interés a nivel industrial por lo que, en muchas ocasiones, sale rentable pagar la diferencia.

Además, el pack de origen bio, contiene un acelerador para asegurar un rápido y efectivo curado de las resinas para la formación del termoestable, componente que las otras resinas no contienen. Esto es otra ventaja que, aunque aumenta el precio del producto bio, se consideró necesario debido a que, en el sector industrial, se pueden alcanzar fácilmente temperaturas de curado de 90°C y con la adición del imidazol, el curado que se obtendrá será mucho más efectivo que solo con calor. En el ámbito doméstico, es algo más complicado alcanzar altas temperaturas para un curado aún más rápido, pero 90°C no es una temperatura tan descabellada de alcanzar, por lo que el imidazol también puede ayudar al curado en ciertos casos para dicho uso.

## **5. CONCLUSIONES**



### 5.1. Conclusiones del trabajo

Actualmente, el uso y producción de plásticos en diversos ámbitos y sectores ha crecido de forma significativa en los últimos años. La mayoría de estos plásticos son de origen fósil lo cual incrementa el nivel de contaminación en el planeta. Para disminuir dicha contaminación, se están realizando una gran cantidad de investigaciones con el objetivo de sustituir estos plásticos de origen petroquímicos por otros provenientes de fuentes renovables como resinas naturales, aceites vegetales, etc.

El aceite de semilla de chía es uno de los aceites vegetales más prometedores debido a su alto IV, que dio un valor de  $199 \text{ I}_2 \text{ g} / 100 \text{ g}$  aceite, lo cual significa que tiene una alta reactividad para unirse a otros compuestos, generando un gran interés industrial e ingenieril. Uno de los métodos más sostenibles de extracción de dicho aceite es el de prensado en frío mediante una extrusora cuyo rendimiento fue del 24,5%.

El aceite obtenido, se modificó químicamente aprovechando su alta reactividad, obteniendo así dos tipos diferentes resinas para, en este caso, poder formar un polímero termoestable apto tanto en aplicaciones industriales como domésticas. Uno de los métodos de modificación fue el de epoxidación, con el fin de obtener una resina que actuase como matriz polimérica. Se especificó que el proceso duraría 8 horas y se añadiría  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  en sus respectivas cantidades. Del ECSO resultante, se obtuvo un % de oxígeno oxiránico de 7,3wt % y un IV de  $114 \text{ I}_2 \text{ g} / 100 \text{ g}$  de aceite. El otro método fue el de maleinización para conseguir una resina biobasada que actuase como endurecedor. En este caso, el proceso duró 3 horas y se adicionó AM. Se obtuvieron parámetros interesantes como un índice de acidez de  $119,7 \text{ mg KOH} / \text{g}$  aceite y un índice de yodo menor al de ECSO, de  $103,8 \text{ I}_2 \text{ g} / 100 \text{ g}$ .

Ambas resinas se mezclaron junto a un porcentaje de endurecedor petroquímico MNA y 1-metilimidazol como acelerador para la formación del polímero termoestable. Los ratios molares que se escogieron fueron MNA 50:50 MCSO y un ratio molar de resina epoxy junto con la mezcla de endurecedores de 1:1.

Se realizó una comparación de las propiedades mecánicas de dureza y resistencia al impacto del termoestable obtenido frente a dos tipos de resinas para la formación de termoestables, pero 100% de origen petroquímico.

Dicha comparación dio como resultado que la resina formada, la cual contenía un 78,5% de composición bio, presentaba una dureza la mitad de elevada que las de origen petroquímico, en cambio su resistencia al impacto fue mayor debido a que al no presentar tanta dureza, presentaba una menor fragilidad respecto a las resinas a comparar. Asimismo, su alto porcentaje biobasado le otorga un mayor interés en la industria.

En cuanto a las propiedades térmicas, al haber desarrollado por primera vez un trabajo experimental para llevar a cabo una resina termoestable basada en aceite de chía, se ha necesitado más tiempo del esperado. Por esta razón, se enfocó únicamente en la temperatura de curado más adecuada para obtener el mayor entrecruzamiento entre resinas. Se obtuvo que se debía calentar durante 3 h a 90°C para luego subir la temperatura a 130°C durante una hora más.

Mediante el diseño de la planta industrial de producción de aceite de chía epoxidado y maleinado, se fijó una cantidad mínima de comercialización de 50 kg/día que resultaron en 51,77 kg/día, de los cuales se produjeron 25 kg de ECSO y 15,63 kg de MCSO. El kit a vender será de 1 kg en total por lo que al día se fabricarán 51 kits.

El coste anual total teniendo en cuenta equipos, consumo energético, materias primas y salarios es de 543.452,15 €. El estudio económico se hizo a 15 años y el precio mínimo de venta del kit producido para no tener pérdidas en 15 años fue de 49,44 €/kg. A priori, parece un precio bastante elevado, pero, en comparación con los dos kits de resina que ya se cotejaron anteriormente desde el punto de vista mecánico, el precio no es desmesurado. Igualmente se debe tener en cuenta el factor bio el cual siempre es un bonus económico y también es un factor muy demandado en la actualidad.

En cuanto a la obtención de beneficios, si el kit se comercializaba a 55 €/kg, se obtenía un valor de 694.688,57 € por lo que el proyecto sería más que aceptable ya que el precio es bastante parejo al de las resinas comparadas y el beneficio es considerable.

Finalmente, se puede concluir con que el aceite de chía, como materia en polímeros termoestables, ofrece muy buenas propiedades mecánicas y una alta reactividad pudiendo ser modificado químicamente de forma sencilla. Esto proporciona un amplio abanico de posibilidades tanto en el ámbito industrial como el doméstico, sin olvidar el bajo impacto ambiental que crea el producto, lo cual es un paso hacia adelante en la carrera por la disminución de la contaminación y del impacto ambiental.

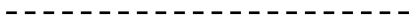







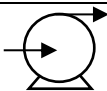
## **6. APÉNDICES**

## Apéndice 1. Sistema de control de tanques y reactores

En el proceso de producción del presente trabajo, se pueden encontrar diferentes tipos de tanques y reactores los cuales son equipos fundamentales para el correcto desarrollo del proceso. Por tanto, es de vital importancia tener el máximo control sobre los parámetros que influyen en dichos equipos, por lo que se coloca un sistema de control tanto de temperatura, caudal, presión y nivel sobre los dichos para evitar fallos y problemas que pueda complicar el proceso productivo.

En la [Tabla 39](#) se muestra una leyenda con el significado de las diferentes corrientes y tipos de elementos de control que se encuentran tanto en los silos de almacenamiento como en los reactores:

**Tabla 39.** Leyenda corrientes y elementos de control.

	Señal eléctrica.
	Señal digital.
	Señal neumática.
	Señal electromagnética o de radio.
	Señal eléctrica binaria.
	Indicador en el interior del equipo.
	Controlador accesible al operario.
	Controlador indicador PLC.
	Bomba centrífuga.

En el caso de los tanques y silos de almacenamiento (Figura 49), no es necesario introducir un controlador de temperatura o de presión, ya que no se va a producir ningún tipo de reacción que altere dichos parámetros. En cambio, sí que es necesario incorporar un controlador de nivel (LC) y de caudal (FC) puesto que en todos los tanques se deberán reponer las materias primas que correspondan, por lo que es importante un control de ello.

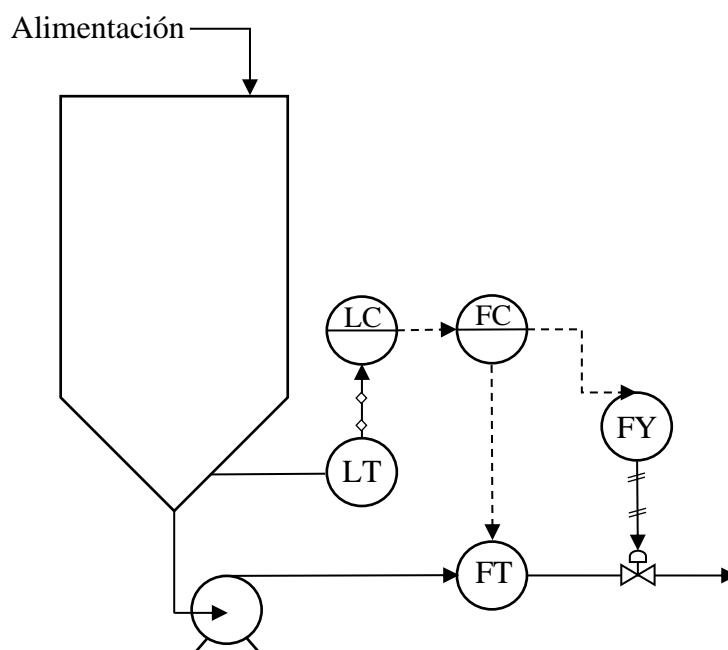
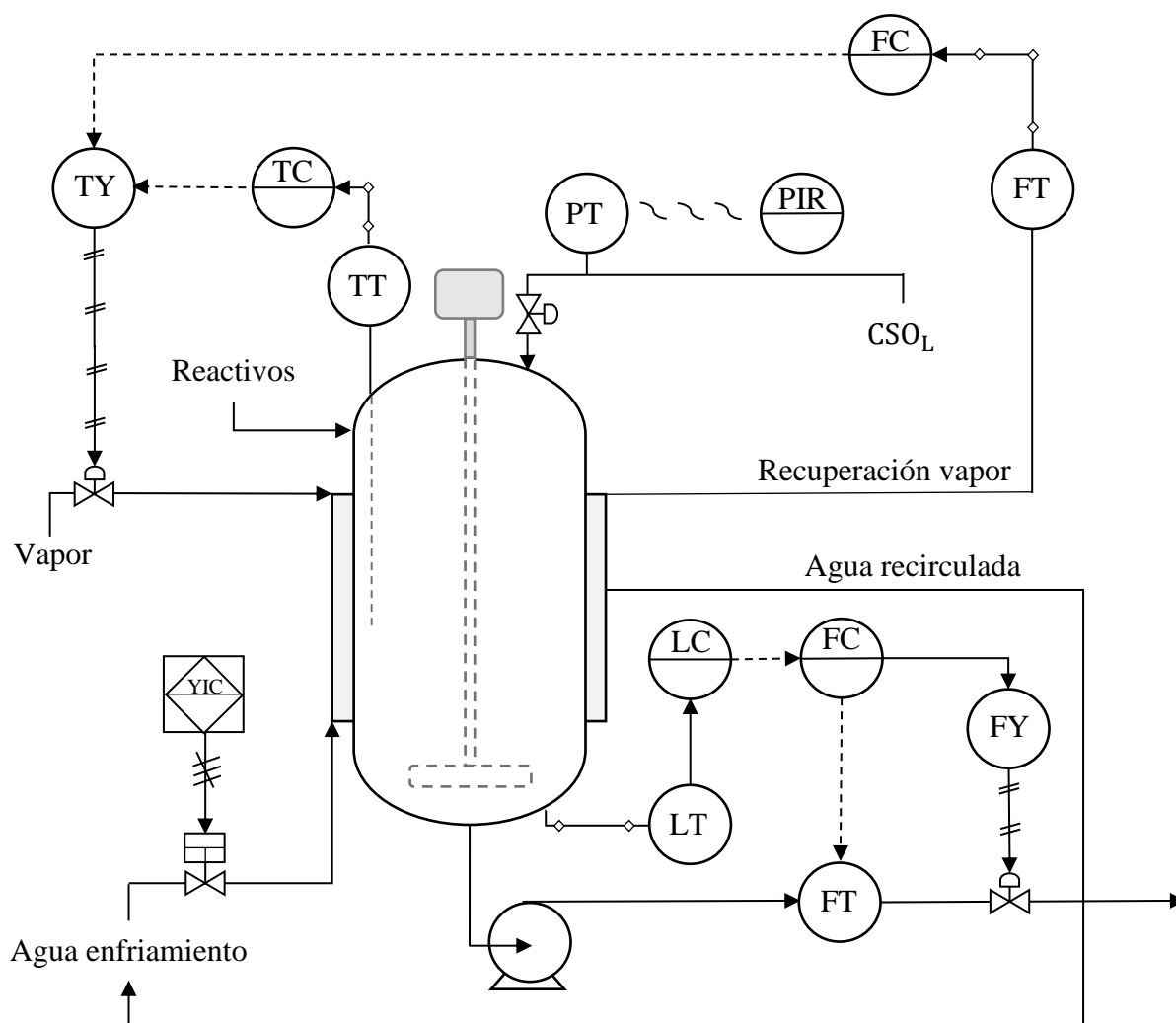


Figura 49. Esquema sistema de control de los tanques de almacenamiento.

El transmisor de nivel y caudal (LT y FT) sirven para pasar de señal digital a eléctrica la cual llega al transductor de caudal (FY) el cual la pasa a señal neumática para controlar la válvula y abrirla o cerrarla en función del nivel y caudal que se registre.

En la Figura 50 se muestra el sistema de control detallado de los reactores de epoxidación y maleinización. En el caso de los reactores sí que es necesario la incorporación de un controlador de temperatura y presión ya que la reacción a trabajar es exotérmica y es fundamental controlarla para así tener una temperatura constante. Además, la presión puede variar a lo largo de la reacción por lo que se introduce el PIR.



**Figura 50.** Esquema sistema de control de los reactores.

En este caso, el TT, TC y TY realizan la misma función que la de FT, DC y FY descrita previamente, convertir la señal digital en señal neumática que controle la válvula para, en este caso, abrir o cerrar el paso de agua según se necesite más o menos vapor.

El transmisor de presión (PT) transmite directamente la señal electromagnética al indicador registrador de presión (PIR) para controlar así un exceso o falta de presión.

Por último, el controlador PLC YIC sirve para regular la entrada del agua que va recirculándose y que sirve para enfriar el reactor en caso de que supere la temperatura de trabajo ideal.

## Apéndice 2. Diagrama de flujo completo del proceso

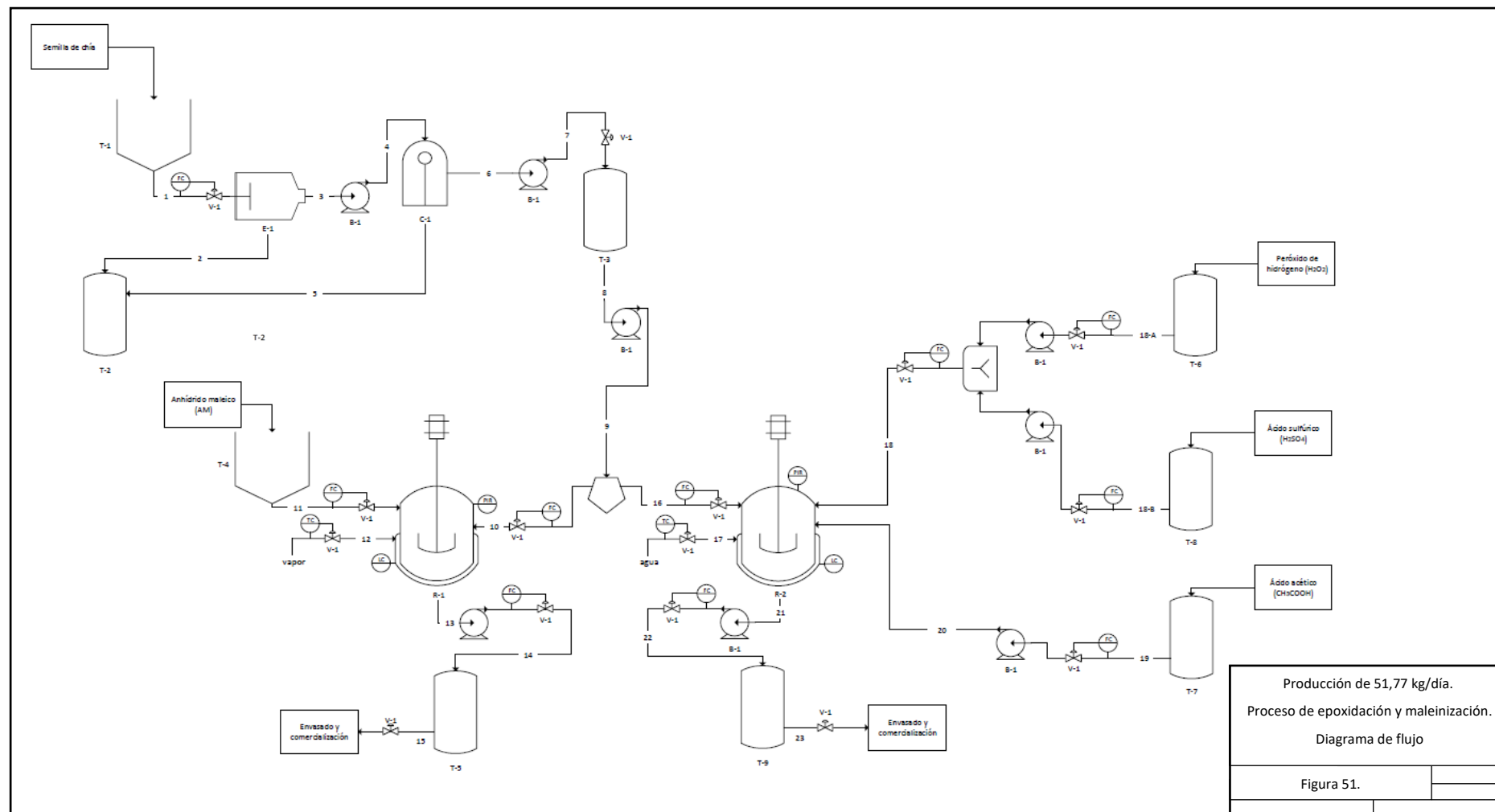


Figura 51. Diagrama de flujos. Proceso productivo de epoxidación y maleinización.

## 6.1. Bibliografía

- [1] Pérez, J. M. G. (2014). La edad de los polímeros: un mundo de plástico. Universidad de Burgos, Servicio de Publicaciones e Imagen Institucional.
- [2] Jensen, W. B. (2008). The origin of the polymer concept. *Journal of Chemical Education*, 85(5), 624.
- [3] Kabasci, S. (2020). Biobased plastics. In *Plastic waste and recycling* (pp. 67-96). Academic Press.
- [4] Reddy, M. M., Vivekanandhan, S., Misra, M., Bhatia, S. K., & Mohanty, A. K. (2013). Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities. *Progress in polymer science*, 38(10-11), 1653-1689.
- [5] Rahman, M. H., & Bhoi, P. R. (2021). An overview of non-biodegradable bioplastics. *Journal of cleaner production*, 294, 126218.
- [6] Vázquez, A., Beltrán, M., Espinosa, R., & Velasco, M. (2016). El origen de los plásticos y su impacto en el ambiente. *Asociación Nacional de La Industria Del Plástico*, 1-14.
- [7] PlasticsEurope (PEMREG). (2022). Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2020 (in million metric tons). Chart. Statista. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>.
- [8] Ansink, E., Wijk, L., & Zuidmeer, F. (2022). No clue about bioplastics. *Ecological Economics*, 191, 107245.
- [9] Rudnik, E. (2012). Environmental impact of compostable polymer materials. *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications*; William Andrew: Norwich, CT, USA, 189.
- [10] Pratima Bajpai. (2019). Chapter 7 - Environmental impact of biobased polymers. *Biobased Polymers*, (pp. 171-181).



- [11] O'Callaghan, J., Head, R. (2020). En las entrañas de la emergencia climática: Cómo las empresas de vienes de consumo están impulsando la expansión de los plásticos de las grandes petroleras. Greenpeace.
- [12] Benson, N. U., Bassey, D. E., & Palanisami, T. (2021). COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. *Heliyon*, 7(2), e06343.
- [13] Bîrcă, A., Gherasim, O., Grumezescu, V., & Grumezescu, A. M. (2019). Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers. In *Materials for Biomedical Engineering* (pp. 1-28). Elsevier.
- [14] Anónimo. Capítulo 1- Características de los termoestables (pp. 7-30).
- [15] Joseph P. Greene. (2021). 11 - Thermoset Polymers. *Automotive Plastics and Composites* (pp. 175-190).
- [16] Sun, J., Zhang, Z., Wang, L., Liu, H., Ban, X., & Ye, J. (2022). Investigation on the epoxy/polyurethane modified asphalt binder cured with bio-based curing agent: Properties and optimization. *Construction and Building Materials*, 320, 126221.
- [17] Gibson, G. (2017). Epoxy resins. In *Brydson's Plastics Materials* (pp. 773-797). Butterworth-Heinemann.
- [18] Xu, H., Tian, G., Meng, Y., Li, X., & Wu, D. (2021). Cure kinetics of a nadic methyl anhydride cured tertiary epoxy mixture. *Thermochimica Acta*, 701, 178942.
- [19] Huang, S., Wang, B., & Yan, L. (2021). Interphase and interfacial properties of composite materials. In *Composite Materials* (pp. 151-177). Elsevier.
- [20] Mallick, P. K. (2021). Thermoset matrix composites for lightweight automotive structures. In *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles* (pp. 229-263). Woodhead Publishing.
- [21] Betron, C., Bounor-Legaré, V., Pinel, C., Scalabrino, G., Djakovitch, L., & Cassagnau, P. (2017). Diffusion of modified vegetable oils in thermoplastic polymers. *Materials Chemistry and Physics*, 200, 107-120.
- [22] Fox, N. J., & Stachowiak, G. W. (2007). Vegetable oil-based lubricants—a review of oxidation. *Tribology international*, 40(7), 1035-1046.

- [23] Varios autores (2008). Grasas y ácidos grasos en nutrición humana. FAO y FINUT. Ginebra (pp. 1-204).
- [24] McNutt, J. (2016). Development of biolubricants from vegetable oils via chemical modification. *Journal of industrial and Engineering Chemistry*, 36, (pp. 1-12).
- [25] Saurabh, T., Patnaik, M., Bhagt, S. L., & Renge, V. C. (2011). Epoxidation of vegetable oils: a review. *Int. J. Adv. Eng. Technol*, 2(4), (pp. 491-501).
- [26] N. Karak. (2012). 7 - Vegetable oil-based epoxies. *Vegetable Oil-Based Polymers*. Woodhead Publishing, (pp. 180-207).
- [27] Ferri, J. M., Garcia-Garcia, D., Montanes, N., Fenollar, O., & Balart, R. (2017). The effect of maleinized linseed oil as biobased plasticizer in poly (lactic acid)-based formulations. *Polymer International*, 66(6), (pp. 882-891).
- [28] Zhang, P., & Zhang, J. (2013). One-step acrylation of soybean oil (SO) for the preparation of SO-based macromonomers. *Green Chemistry*, 15(3), (pp. 641-645).
- [29] Rios, L., Echeverri, D., & Cardeño, F. (2013). Hydroxylation of vegetable oils using acidic resins as catalysts. *Industrial Crops and Products*, 43, (pp. 183-187).
- [30] Espinosa Plaza, A. (2017). Propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales de la chíá (salvia hispánica L.) y de su extracto desgrasado.
- [31] Giakoumis, E. G. (2018). Analysis of 22 vegetable oils' physico-chemical properties and fatty acid composition on a statistical basis, and correlation with the degree of unsaturation. *Renewable energy*, 126, (pp. 403-419).
- [32] Zheng, J., & Suh, S. (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. *Nature Climate Change*, 9(5), (pp. 374-378).
- [33] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. (2013). *Policies for Bioplastics in the Context of a Bioeconomy*. OECD Publishing.
- [34] Alba, L., Brown, A., de la Hoz, Y., Gregorí, B. S., Bordado, J. M., Alvarez, A., & Fernández, M. (2007). Los poliuretanos biodegradables. Estudio bibliográfico de su síntesis y aplicaciones. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 41(2), 3-9.

- [35] Fombuena V. (2022). Guion prácticas de ciencia y tecnología de biopolímeros. Ciencia y tecnología de biopolímeros.
- [36] Ramos L (2020). La promesa de los bioplásticos. Imagen. European Bioplastics. <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/la-promesa-de-los-bioplasticos/>.
- [37] UPV. Unidad 15: Materiales poliméricos y compuestos. Polímeros termoestables. [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15\\_6.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_6.html)
- [38] Van den Oever, M., Molenveld, K., van der Zee, M., & Bos, H. (2017). Bio-based and biodegradable plastics: facts and figures: focus on food packaging in the Netherlands (No. 1722). Wageningen Food & Biobased Research.
- [39] Sánchez, L. Tema 13: Polímeros termoestables. Asignatura de ampliación de ciencias de materiales. 2022.
- [40] Composites Manufacturing (2016). Composite materials demand in the United States in 2015 and 2021, by application (in billion U.S dollars). Statista. <https://www.statista.com/statistics/647150/composite-materials-demand-in-the-united-states-by-application/>.
- [41] Gralínco. Usos industriales de los aceites vegetales más allá de alimentación y cosmética. <https://gralínco.com/usos-industriales-de-los-aceites-vegetales-mas-alla-de-alimentacion-y-cosmetica/>.
- [42] US Department of Agriculture; USDA Foreign Agricultural Service. (2022). Consumption of vegetable oils worldwide from 2013/14 to 2021/2022, by oil type (in million metric tons). Statista. <https://www.statista.com/statistics/263937/vegetable-oils-global-consumption/>.
- [43] Sánchez, L. Tema 14: Materiales compuestos. Asignatura de ampliación de ciencias de materiales. 2022.
- [44] Ferrero P. Biotecnología y plásticos. Chart. <https://futurenviro.es/biotecnologia-y-plasticos/>.
- [45] Martínez, M. L., Marín, M. A., Faller, C. M. S., Revol, J., Penci, M. C., & Ribotta, P. D. (2012). Chia (*Salvia hispanica* L.) oil extraction: Study of processing parameters. *LWT-Food Science and Technology*, 47(1), (pp. 78-82).

- [46] Ixtaina, V. Y., Martínez, M. L., Spotorno, V., Mateo, C. M., Maestri, D. M., Diehl, B. W., ... & Tomás, M. C. (2011). Characterization of chia seed oils obtained by pressing and solvent extraction. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(2), (pp. 166-174).
- [47] Uribe, J. A. R., Perez, J. I. N., Kauil, H. C., Rubio, G. R., & Alcocer, C. G. (2011). Extraction of oil from chia seeds with supercritical CO<sub>2</sub>. *The Journal of Supercritical Fluids*, 56(2), (pp. 174-178).
- [48] Liu, C., Liu, Z., Tisserat, B. H., Wang, R., Schuman, T. P., Zhou, Y., & Hu, L. (2015). Microwave-assisted maleation of tung oil for bio-based products with versatile applications. *Industrial Crops and Products*, 71, (pp. 185-196).
- [49] ASTM International. (2012). Standard Test Method for Epoxy Content of Epoxy Resins. ASTM International.
- [50] AENOR. (2018). Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de yodo. ISO 3961:2018.
- [51] AENOR. (2020). Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de acidez y de la acidez. ISO 660:2020.
- [52] Ragosta, G., Musto, P., Scarinzi, G., & Mascia, L. (2003). Effects of perfluoroether concentration and curing protocol on morphology and mechanical properties of toughened TGDDM/MNA resin systems. *Polymer*, 44(7), (pp. 2081-2090).
- [53] De, B., Gupta, K., Mandal, M., & Karak, N. (2014). Biodegradable hyperbranched epoxy from castor oil-based hyperbranched polyester polyol. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(3), (pp. 445-453).
- [54] Fink, J. K. (2013). Unsaturated polyester resins. *Reactive Polymers Fundamentals and Applications*, (pp. 1-48).
- [55] Centrifugadora con separación de amalgama1 MST 1. <https://dentalshopdiscount.com/tienda/aparatologia/inspiracion aparatologia/motor-de-aspiracion/centrifugadora-con-separacion-de-amalgama-mst-1/#>.
- [56] Extrusora de aceite modelo MS6YL-70H. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Food-safety-olive-oil-mill-for-60793854334.html>

- [57] Silo de almacenamiento EUROKRAFTpro. [https://www.kaiserkraft.es/recipientes-de-almacenaje/contenedores-con-trampilla-silos/silo/capacidad-1-m-con-cierre-deslizante-en-la-parte-frontal/p/M1082574/?kk=a4c6293-18119ef7f1d-196f4e&gclid=Cj0KCQjwdaUBhCIARIsALbkjSbxo4L\\_ffD0D1IXc03X5B9QCclBxFpje7D\\_EdVz08i79wnAPBWN6QwaAjWzEALw\\_wcB&articleNumber=927](https://www.kaiserkraft.es/recipientes-de-almacenaje/contenedores-con-trampilla-silos/silo/capacidad-1-m-con-cierre-deslizante-en-la-parte-frontal/p/M1082574/?kk=a4c6293-18119ef7f1d-196f4e&gclid=Cj0KCQjwdaUBhCIARIsALbkjSbxo4L_ffD0D1IXc03X5B9QCclBxFpje7D_EdVz08i79wnAPBWN6QwaAjWzEALw_wcB&articleNumber=927).
- [58] Depósito de acero inoxidable con fondo plano y tapa. [https://inviashop.com/es/depositos-para-vino/9-45depositos-acero-inox-para-vino-con-fondo-plano-y-tapa-siempre-lleno-cierre-neumatico.html#/69depositos\\_fondo\\_plano\\_tapa\\_siempre\\_lleno-75\\_litros](https://inviashop.com/es/depositos-para-vino/9-45depositos-acero-inox-para-vino-con-fondo-plano-y-tapa-siempre-lleno-cierre-neumatico.html#/69depositos_fondo_plano_tapa_siempre_lleno-75_litros).
- [59] Reactor encamisado de acero inoxidable y con agitación modelo FCH 100L. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/stainless-steel-high-pressure-stirred-100l-jacketed-reactor-1600187762060.html>
- [60] Reactor encamisado de acero inoxidable y con agitación modelo SS-20L. [https://spanish.alibaba.com/p-detail/20L-1600413850197.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.795d2d0f12nRij](https://spanish.alibaba.com/p-detail/20L-1600413850197.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.795d2d0f12nRij).
- [61] Mercabomba. Catálogo-Tarifa. Bombas para fluidos. Bomba centrífuga multicelular modelo MS 07.
- [62] RSpro. Datasheet. Full port 1/4"-4" hot forged brass ball valves.
- [63] Termómetro bimetalico tipo 55. Termómetro bimetalico - 55 - WIKA España.
- [64] Caudalímetro Vortex ifm electronic SV7200 - SVR34XXXIRKG/US-100. [https://www.automation24.es/caudalimetro-vortex-ifm-electronic-sv7200-svr34xxxirkg-us-100?previewPriceListId=1&refID=adwords\\_shopping\\_ES&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjUh\\_iJmBAKEzGWQXALcMNxOtoyDo0FPt-uo8z-SLz\\_mColwENeNPkIaAsfOEALw\\_wcB](https://www.automation24.es/caudalimetro-vortex-ifm-electronic-sv7200-svr34xxxirkg-us-100?previewPriceListId=1&refID=adwords_shopping_ES&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjUh_iJmBAKEzGWQXALcMNxOtoyDo0FPt-uo8z-SLz_mColwENeNPkIaAsfOEALw_wcB).
- [65] Sensor de nivel capacitivo Endress+Hauser Liquicap FMI21-B1A1C1|1000 mm. <https://www.automation24.es/sensor-de-nivel-capacitivo-endress-hauser-liquicap-fmi21-b1a1c1-1000-mm>.
- [66] Manómetro de acero inoxidable M20x1,5. <https://www.termometros.com/Man%C3%B3metros-de-acero-inoxidable-%C3%98100mm-con-vidrio-de-seguridad-y-rosca-m%C3%A9trica-M20x1.5>.

- [67] Silo almacenamiento anhídrido maleico RAL 7005. [https://www.junghenrich-profishop.es/Bauer-contenedor-silo-pintado-con-cerradura-de-tijera-y-ruedas-43653-244777/?Shop=b2c&sd=true&gclid=Cj0KCQjw-daUBhCIARIsALbkjSbSxqhFEps6C9jujAijCoh-B-91d9O7QRxN3hGNMaUrCL3rVOiL5GEaArhbEALw\\_wcB&gclsrc=aw.ds](https://www.junghenrich-profishop.es/Bauer-contenedor-silo-pintado-con-cerradura-de-tijera-y-ruedas-43653-244777/?Shop=b2c&sd=true&gclid=Cj0KCQjw-daUBhCIARIsALbkjSbSxqhFEps6C9jujAijCoh-B-91d9O7QRxN3hGNMaUrCL3rVOiL5GEaArhbEALw_wcB&gclsrc=aw.ds).
- [68] Densidad harina de chía. [http://www.agroseller.net/chia\\_chia\\_arroz\\_es.html](http://www.agroseller.net/chia_chia_arroz_es.html).
- [69] Dominguez-Candela, I., Gomez-Caturla, J., Cardona, S. C., Lora-García, J., & Fombuena, V. (2022). Novel compatibilizers and plasticizers developed from epoxidized and maleinized chia oil in composites based on PLA and chia seed flour. *European Polymer Journal*, 111289.
- [70] Tarifa de la luz. PepeEnergy. <https://www.pepeenergy.com/tarifas-luz>
- [71] Resolución de 7 de julio de 2021. BOE-12038. Resolución por la que se registra y publica el XX Convenio colectivo general de la industria química. <https://www.boe.es/boe/dias/2021/07/19/pdfs/BOE-A-2021-12038.pdf>.
- [72] Tasa de variación anual del IPC. <https://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/espana#:~:text=La%20variaci%C3%B3n%20mensual%20del%20IPC,es%20del%204%2C1%25>.
- [73] Kit resina epoxy transparente WWAS+WWB4. <https://www.resineco.com/es/resina-epoxi/epoxi-transparente/kit-resina-epoxi-transparente-wwaswwb4.html>.
- [74] Kit resina epoxy MP Advanced + Endurecedor MP Advanced. <https://www.r-g.de/en/art/125155>.
- [75] Gravimetric (by weight) filling system, by valve double controlled and load cell scale <https://www.nanninirenato.com/es/llenadoras-ensadoras/ensadoras-semiautomaticas-por-peso-en-tarros-botes-mod-dg10/#gref>.
- [76] Nave Industrial. <https://www.servihabitat.com/es/venta/nave/valencia-riberaalta-senyera/60485333>.