



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Desarrollo y evaluación de una resina termoestable bio
basada en aceite de cáñamo: viabilidad técnica y
económica

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Boronat Castellar, Irene

Tutor/a: Fombuena Borrás, Vicent

Cotutor/a externo: López Borrell, Alexis

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

Resumen

“Desarrollo y evaluación de una resina termoestable bio basada en aceite de cáñamo: viabilidad técnica y económica”

En los últimos años ha aumentado la producción y consumo de plásticos de origen petroquímico a nivel masivo ocasionando graves problemas para el medioambiente. Esta problemática ha generado un gran interés por sustituir materiales de origen fósil por alternativas sostenibles y renovables, como respuesta a la creciente preocupación ambiental. Dentro del abanico de materias primas disponibles, los aceites vegetales representan una alternativa ecológica y ofrecen una elevada versatilidad funcional para el desarrollo de polímeros termoestables, especialmente cuando son modificados mediante procesos como la epoxidación o la maleinización.

En este trabajo se pretende lograr una revalorización integral del aceite de cáñamo (*Cannabis Sativa L.*), una fuente vegetal rica en ácidos grasos insaturados, para el desarrollo de un polímero termoestable biobasado a partir de aceite de cáñamo epoxidado y aceite de cáñamo maleinizado, incorporando distintas proporciones de la cáscara de cáñamo que se genera tras la extrusión de la semilla (0 – 20%). La caracterización térmica y mecánica de las diferentes formulaciones permite identificar como óptima la muestra que contiene un 10 % de carga, la cual se emplea como base para el diseño del proceso productivo.

Finalmente, se dimensiona y se realiza un estudio económico de una planta industrial con capacidad para producir 40 baldosas diarias. Se establece un precio de venta competitivo, y el análisis económico permite prever la recuperación de la inversión, con un VAN de 237.709 €, una TIR del 26,78 % y un periodo de retorno de 6 años.

Palabras clave: termoestables, biopolímero, semilla de cáñamo, aceite de cáñamo, epoxidación, maleinización.

Summary

“Development and Evaluation of a Thermoset Resin Based on Hemp Oil: Technical and Economic Feasibility”

In recent years, the large-scale production and consumption of petrochemical-based plastics has increased significantly, causing serious environmental problems. This issue has generated strong interest in replacing fossil-based materials with sustainable and renewable alternatives, in response to growing environmental concerns. Among the available raw materials, vegetable oils represent an ecological alternative and offer high functional versatility for the development of thermoset polymers, especially when modified through processes such as epoxidation or maleination.

This work aims to achieve the integral valorization of hemp oil (*Cannabis sativa L.*), a vegetable source rich in unsaturated fatty acids, for the development of a biobased thermoset polymer derived from epoxidized hemp oil and maleinated hemp oil, incorporating different proportions of hemp husk generated after seed extrusion (0–20%). Thermal and mechanical characterization of the different formulations identifies the sample with 10 % filler content as the most suitable, which is then used as the basis for the design of the production process.

Finally, a production plant is dimensioned and a techno-economic analysis is carried out for an industrial facility with the capacity to produce 40 tiles per day. A competitive selling price is established, and the economic analysis forecasts investment recovery with a Net Present Value (NPV) of €237,709, an Internal Rate of Return (IRR) of 26.78%, and a payback period of 6 years.

Keywords: thermosets, biopolymer, hemp seed, hemp oil, epoxidation, maleination.

Resum

“Desenvolupament i avaluació d’una resina termoestable biobasada en oli de cànem: viabilitat tècnica i econòmica”

En els últims anys, la producció i el consum massiu de plàstics d’origen petroquímic ha augmentat considerablement, provocant greus problemes mediambientals. Aquesta problemàtica ha generat un gran interès per substituir materials d’origen fòssil per alternatives sostenibles i renovables, com a resposta a la creixent preocupació ambiental. Dins del ventall de matèries primeres disponibles, els olis vegetals representen una alternativa ecològica i ofereixen una elevada versatilitat funcional per al desenvolupament de polímers termoestables, especialment quan són modificats mitjançant processos com l’epoxidació o la maleinització.

Aquest treball pretén aconseguir una revalorització integral de l’oli de cànem (*Cannabis sativa L.*), una font vegetal rica en àcids grassos insaturats, per al desenvolupament d’un polímer termoestable biobasat a partir d’oli de cànem epoxilat i oli de cànem maleinitzat, incorporant diferents proporcions de la closca de cànem generada després de l’extrusió de la llavor (0–20 %). La caracterització tèrmica i mecànica de les diferents formulacions permet identificar com a òptima la mostra amb un 10 % de càrrega, la qual s’utilitza com a base per al disseny del procés productiu.

Finalment, es dimensiona i es realitza un estudi econòmic d’una planta industrial amb capacitat per a produir 40 rajoles diàries. S’estableix un preu de venda competitiu i l’anàlisi econòmica preveu la recuperació de la inversió, amb un Valor Actual Net (VAN) de 237.709 €, una Taxa Interna de Retorn (TIR) del 26,78 % i un període de retorn de 6 anys.

Paraules clau: termoestables, biopolímer, llavor de cànem, oli de cànem, epoxidació, maleinització.

Tabla de Contenidos

Contenido

1	Motivación	12
2	Introducción	14
2.1	Situación actual de los polímeros	14
2.1.1	Producción mundial	14
2.1.2	Impacto ambiental	17
2.2	Clasificación de los polímeros	18
2.2.1	Según su origen	19
2.2.2	Según su estructura	22
2.3	Aceites vegetales en ingeniería	24
2.3.1	Estructura y propiedades de los aceites vegetales	25
2.3.2	Modificaciones químicas	27
2.3.3	Usos y aplicaciones de los aceites vegetales modificados ..	29
2.4	Producción mundial de cáñamo	30
2.4.1	Propiedades	34
2.5	Materiales compuestos tipo WPC (Wood Plastic Composite) y NFRP (Natural Fiber Plastic Composite)	35
2.5.1	Propiedades	36
3	Objetivos	38
3.1	Objetivo general	38
3.2	Objetivos particulares	38
3.3	Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	39
4	Desarrollo del proyecto	42
4.1	Materiales	43
4.2	Procedimiento experimental	44

4.2.1	Obtención del aceite de cáñamo	44
4.2.2	Técnicas de caracterización del aceite epoxidado y maleinizado	50
4.2.3	Proceso de entrecruzamiento y curado de las probetas	53
4.2.4	Técnicas de caracterización del termoestable	55
5	Resultados	59
5.1	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	59
5.2	Caracterización mecánica del termoestable	60
5.2.1	Ensayo Charpy: Prueba de impacto	60
5.2.2	Ensayo de dureza	62
5.2.3	Ensayo de absorción de agua	63
5.3	Comparativa con resinas termoestables comerciales	64
5.4	Cinética del reactor de epoxidación	66
6	Estudio económico	72
6.1	Diseño de las instalaciones a escala industrial	72
6.1.1	ETAPA 1: Extracción del aceite de cáñamo	74
6.1.2	ETAPA 2: Modificación química del aceite de cáñamo	81
6.1.3	ETAPA 3: Procesado de las baldosas	94
6.1.4	Equipos globales en todo el proceso	99
6.2	Cronograma del proceso productivo	100
6.3	Estudio de viabilidad económica del proyecto	102
6.3.1	Presupuesto materiales y reactivos	103
6.3.2	Presupuesto equipos	103
6.3.3	Presupuesto planta industrial	105
6.3.4	Presupuesto consumo energético	108
6.3.5	Presupuesto personal	112
6.3.6	Presupuesto total	113

6.3.7	Rentabilidad.....	113
6.3.8	Análisis de los resultados	119
7	Conclusiones.....	121
8	Referencias	123
9	Anexos	126
9.1	Comunicaciones científicas.....	126
9.2	Script archivos Matlab	127
9.3	Planos	132

Listado de figuras

Figura 1. Producción mundial de materiales plásticos 2018 - 2023 según su origen y su fin de vida [2].....	15
Figura 2. Reparto de la producción mundial de materiales plásticos 2023 según regiones mundiales [2].....	17
Figura 3. Clasificación polímeros según su origen y fin de vida [3].....	19
Figura 4. Comparativa de la producción de polímeros de origen fósil y biobasados [2]	22
Figura 5. Estructura representativa de un polímero termoplástico [7] ...	23
Figura 6. Estructura representativa de un polímero termoestable [7] ...	24
Figura 7. Ejemplo de estructura química del triglicérido	26
Figura 8. Esquema de la reacción de epoxidación [12]	28
Figura 9. Reacción de maleinización [13]	29
Figura 10. Semilla de cáñamo (<i>Cannabis sativa</i> L.).....	31
Figura 11. Principales países exportadores de cáñamo en Europa en 2022 [13]	32
Figura 12. WPC de distintos acabados finales [20].....	35
Figura 13. Objetivos particulares del trabajo	39
Figura 14. Partes de la extrusora de prensado en frío	45
Figura 15. Máquina centrífuga	46
Figura 16. Montaje experimental del proceso de epoxidación	46
Figura 17. Embudo de decantación aceite de cáñamo epoxidado.....	48
Figura 18. Montaje experimental de la maleinización de aceite de cáñamo.	49
Figura 19. Montaje experimental de la valoración de oxígeno oxiránico	50
Figura 20. Variación de tonalidad del aceite durante la valoración del oxígeno oxiránico	51
Figura 21. Variación de tonalidad del aceite durante la valoración del índice de yodo	52
Figura 22. Probetas con diferentes concentraciones de carga tras el curado	54
Figura 23. Equipo DSC Mettler-Toledo 821	55
Figura 24. Péndulo Charpy	56

Figura 25. Durómetro Shore D	57
Figura 26. Ensayo de absorción de agua.....	58
Figura 27. Comparación de los termogramas dinámicos de DSC del proceso de curado de diferentes muestras compuestas de aceite de cáñamos epoxidado (ACE), aceite de cáñamo maleinizado (ACM) y contenidos variables de cáscara de cáñamo	59
Figura 28. Resultados del ensayo de resistencia al impacto Charpy para los termoestables con diferentes porcentajes de carga	61
Figura 29. Representación de los datos experimentales de dureza Shore D.....	63
Figura 30. Ensayo de absorción de agua.....	63
Figura 31. Comparación de las propiedades físicas de las muestras experimentales de cáñamo con resina comercial Weicon UW	65
Figura 32. Simulación de oxígeno oxiráico durante la reacción de epoxidación	70
Figura 33. Diagrama de flujo de la etapa 1 del proceso de producción	74
Figura 34. Separadora centrífuga industrial [28]	75
Figura 35. Máquina extrusora industrial de un solo tornillo [30]	77
Figura 36. Silos de almacenamiento para la semilla de cáñamo [31] ...	78
Figura 37. Bolsa tipo “Big Bag” para almacenamiento de la carga en venta [32]	79
Figura 38. Molino triturador industrial.....	79
Figura 39. Depósito de acero inoxidable para el almacenamiento de aceite [34].....	80
Figura 40. Diagrama de flujo de la etapa 2 del proceso productivo	81
Figura 41. Tiempo de retención y concentración óptima para el proceso de epoxidación	85
Figura 42. Reactor discontinuo de tanque agitado (RDTA) [35].....	86
Figura 43. Diagrama de procesos de la etapa 3 del proceso productivo	95
Figura 44. Distribución de los módulos de la línea de resinado de Breton para el procesado de las baldosas [39].....	98
Figura 45. Diagrama de Gantt del proceso de producción de baldosas a partir de aceite de cáñamo epoxidado. Realizado con ClickUp.....	102

Figura 46. Solar para la planta de producción de baldosas de cáñamo epoxidado en Extremadura	106
Figura 47. Precio de la luz por horas del día 1 de julio del 2025.....	111

Listado de tablas

Tabla 1. Estructura química de los ácidos grasos [10]	27
Tabla 2. Principales ácidos grasos del aceite de cáñamo [13]	34
Tabla 3. Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	40
Tabla 4. Composiciones de cáscara de cáñamo para la fabricación termoestable.....	53
Tabla 5. Datos experimentales, desviación y error del ensayo Charpy .	61
Tabla 6. Datos experimentales, desviación y error del ensayo de dureza.	62
Tabla 7. Parámetros cinéticos obtenidos del ajuste no lineal de la reacción de epoxidación del aceite de cáñamo	70
Tabla 8. Cantidades de los reactivos necesarios para la producción diaria y semanal de las baldosas	73
Tabla 9. Características generales centrífuga utilizada en la etapa 1 [27]	75
Tabla 10. Características generales extrusora utilizada en la etapa 1 [29]	77
Tabla 11. Características generales trituradora utilizada en la etapa 1 [33]	79
Tabla 12. Comparativa de los silos de almacenamiento para la etapa 1	80
Tabla 13. Depósito de almacenamiento para la etapa 1	81
Tabla 14. Especificaciones del RDTA para la reacción de epoxidación [36]	87
Tabla 15. Especificaciones del reactor de maleinización	92
Tabla 16. Comparativa de los depósitos necesarios para la etapa 2 del proceso	94
Tabla 17. Silo de almacenamiento para la etapa 2	94
Tabla 18. Composición para la producción de una baldosa	95
Tabla 19. Comparativa de los depósitos necesarios para la etapa 3 del proceso	97
Tabla 20. Especificaciones generales de la bomba centrífuga [40].....	99

Tabla 21. Especificaciones generales de la válvula de bola [41].....	99
Tabla 22. Especificaciones generales de todos los controladores utilizados durante el proceso.....	100
Tabla 23. Cantidades y costes de materiales y reactivos.....	103
Tabla 24. Coste equipos de almacenamiento	104
Tabla 25. Costes equipos de producción	104
Tabla 26. Coste equipos auxiliares	105
Tabla 27. Resumen costes totales de reactivos y equipos.....	105
Tabla 28. Costes directos de la instalación	107
Tabla 29. Equipos con sus respectivas potencias	108
Tabla 30. Potencia diaria equipos	109
Tabla 31. Potencia diaria de iluminación	109
Tabla 32. Precios anuales por kW contratado para cada periodo	110
Tabla 33. Coste electricidad anual con IVA.....	112
Tabla 34. Coste anual personal empleado	113
Tabla 35. Coste total de inversión	113
Tabla 36. Costes directos e indirectos	115
Tabla 37. Ingresos anuales	117

1 Motivación

Actualmente nos encontramos en un estado de emergencia climática donde preocupa el agotamiento de recursos fósiles. Por ello, se está produciendo una transformación hacia modelos de producción más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

En consecuencia, las diferentes industrias han convertido en una prioridad el desarrollo de nuevos materiales que reduzcan la dependencia de derivados del petróleo, especialmente el sector de los polímeros.

La creciente importancia de los polímeros en la industria y el elevado consumo de ellos por la sociedad plantea la necesidad de encontrar una fuente de materia prima de origen renovable. En este sentido, se sitúan los aceites vegetales como una alternativa prometedora como base para la obtención de polímeros biobasados. Estos aceites, permiten su modificación química mediante procesos como la epoxidación y la maleinización, gracias a su estructura rica en ácidos grasos insaturados, facilitando su aplicación en la fabricación de resinas y materiales termoestables. En particular, el aceite de semilla de cáñamo (*Cannabis sativa L.*) destaca por su elevada insaturación, lo que lo hace especialmente adecuado para estas transformaciones.

Además, la industria agroalimentaria genera una gran cantidad de residuos que, en la mayoría de los casos, no son aprovechados adecuadamente. La cáscara de cáñamo, subproducto del proceso de extracción del aceite, contiene una alta proporción de fibra vegetal que puede ser utilizada como carga natural en materiales compuestos. El añadirlo en matrices poliméricas no solo mejora ciertas propiedades mecánicas, sino que también permite revalorizar un residuo, reduciendo el volumen de desechos y aportando un valor añadido al producto final. Esta doble utilización de la semilla, empleando tanto el aceite como su subproducto sólido contribuye a la reducción del impacto ambiental producido por el proceso productivo.

Por todo ello, en este Trabajo de Fin de Grado se busca desarrollar y caracterizar un material polimérico termoestable parcialmente biobasado a partir

1.Motivación

del aceite de cáñamo modificado químicamente y reforzado con cáscara de cáñamo. Además, también se busca diseñar una planta piloto de producción demostrando la viabilidad técnica y económica del proceso con el fin de evaluar la implementación a escala industrial, contribuyendo así al desarrollo de materiales funcionales más sostenibles y competitivos.

2 Introducción

2.1 Situación actual de los polímeros

En las últimas décadas, los polímeros han experimentado un desarrollo exponencial, debido a su versatilidad, resistencia y bajo costo de producción. Estos materiales se han convertido en componentes esenciales en aplicaciones fundamentales en la industria moderna, desde sectores como el embalaje o la construcción hasta la electrónica y el transporte. Este crecimiento, impulsado por una creciente demanda global de materiales ligeros y duraderos, ha permitido satisfacer las necesidades de una población en constante aumento. No obstante, el excesivo uso de estos materiales también ha generado importantes problemas medioambientales relacionados con la sostenibilidad y la gestión de los residuos que generan [1].

2.1.1 Producción mundial

Los polímeros son macromoléculas formadas por la repetición de unidades básicas llamadas monómeros, conectadas entre sí mediante enlaces covalentes. Su nombre proviene del griego poly (“muchos”) y meros (“partes”), lo que destaca su naturaleza de cadenas largas y repetitivas. Desde el inicio de la humanidad, los polímeros naturales, como la celulosa en las plantas o el ADN en los organismos vivos, han sido esenciales para la vida en la Tierra. Sin embargo, fue el desarrollo de los polímeros sintéticos y modificados el que transformó radicalmente la historia industrial y tecnológica del ser humano.

Aunque los polímeros naturales, como el caucho, ya se utilizaban en culturas prehispánicas como la azteca y maya para fabricar pelotas y utensilios, no fue hasta el siglo XIX cuando el ser humano comenzó a transformar químicamente estos materiales. Un ejemplo destacable es la vulcanización del caucho, descubierta por Charles Goodyear en 1839, que permitió transformar un material pegajoso y poco resistente en un polímero duradero y elástico. Este avance marcó uno de los primeros pasos hacia el auge de los polímeros modificados.

2.Introducción

Otro hito decisivo fue la invención del celuloide en 1869 por John Wesley Hyatt, como respuesta a la necesidad de sustituir el marfil en objetos cotidianos como bolas de billar. Este fue el primer polímero termoplástico de origen sintético, lo que abrió la puerta a la creación de materiales moldeables que podían sustituir recursos naturales cada vez más escasos.

En las décadas posteriores, la industrialización y la creciente demanda global impulsaron el desarrollo de nuevos polímeros sintéticos como el nailon en 1935 por Wallace Carothers. Este material, inicialmente creado para fabricar fibras textiles, revolucionó industrias como la moda y la ingeniería, demostrando la versatilidad de los polímeros para adaptarse a diversas aplicaciones.

Actualmente, la producción de polímeros ha alcanzado cifras impresionantes. Como podemos observar en la Figura 1, en 2023, la producción global de plásticos alcanzó un récord de 413,8 millones de toneladas.

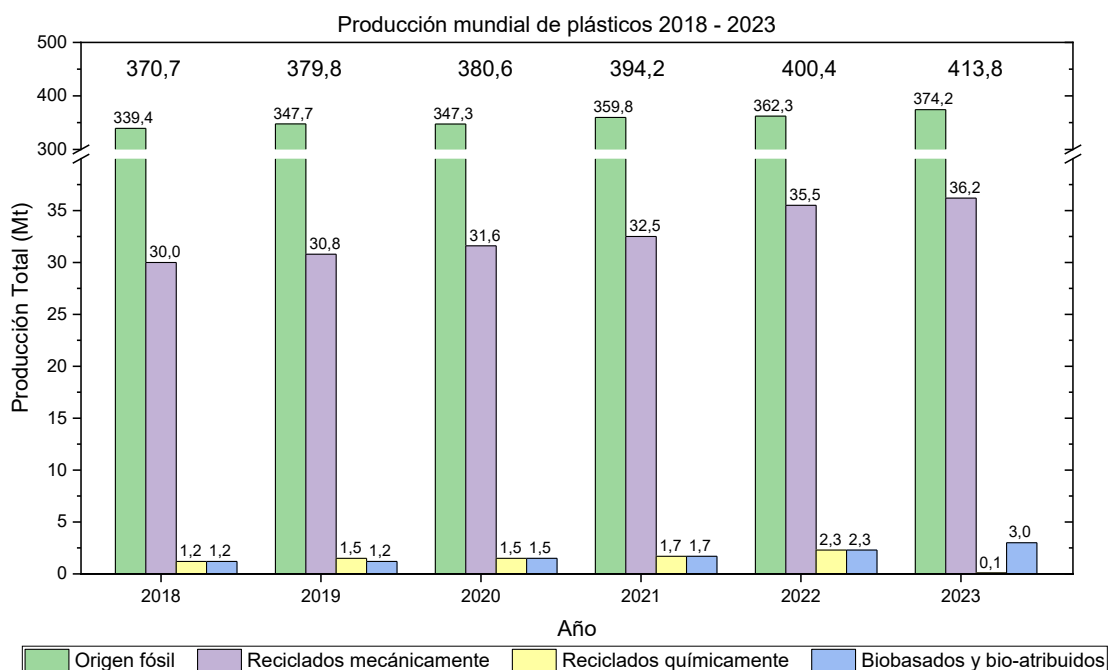


Figura 1. Producción mundial de materiales plásticos 2018 - 2023 según su origen y su fin de vida [2]

2.Introducción

Este aumento refleja la constante demanda de plásticos en diversos sectores y la expansión de la economía global. A lo largo de este período, también se observa un crecimiento en la proporción de plásticos reciclados mecánicamente, que han pasado de 30 millones de toneladas en 2018 a 36,2 millones en 2023, mientras que los plásticos biobasados y químicos, aunque aún representan una fracción menor, han comenzado a integrarse en el mercado global. Sin embargo, los plásticos de origen fósil siguen dominando ampliamente la producción mundial [2].

Como podemos observar en la Figura 2, a nivel mundial, China lidera la producción de plásticos con un 36,63%, seguida por Asia (21,67%) y América del Norte (18,81%). Europa es el cuarto productor de plásticos a nivel global con un 13,53%. A pesar de ser el cuarto productor de plásticos, también podemos observar que es la tercera potencia mundial en la producción de plásticos reciclados con un 19,80% y la segunda potencia mundial en la producción de plásticos biobasados o bio-atribuidos a nivel mundial con un 25,28% del total. Sin embargo, Europa sigue buscando la integración de un modelo de economía circular para reducir su dependencia de los recursos fósiles y disminuir el impacto ambiental.

2.Introducción

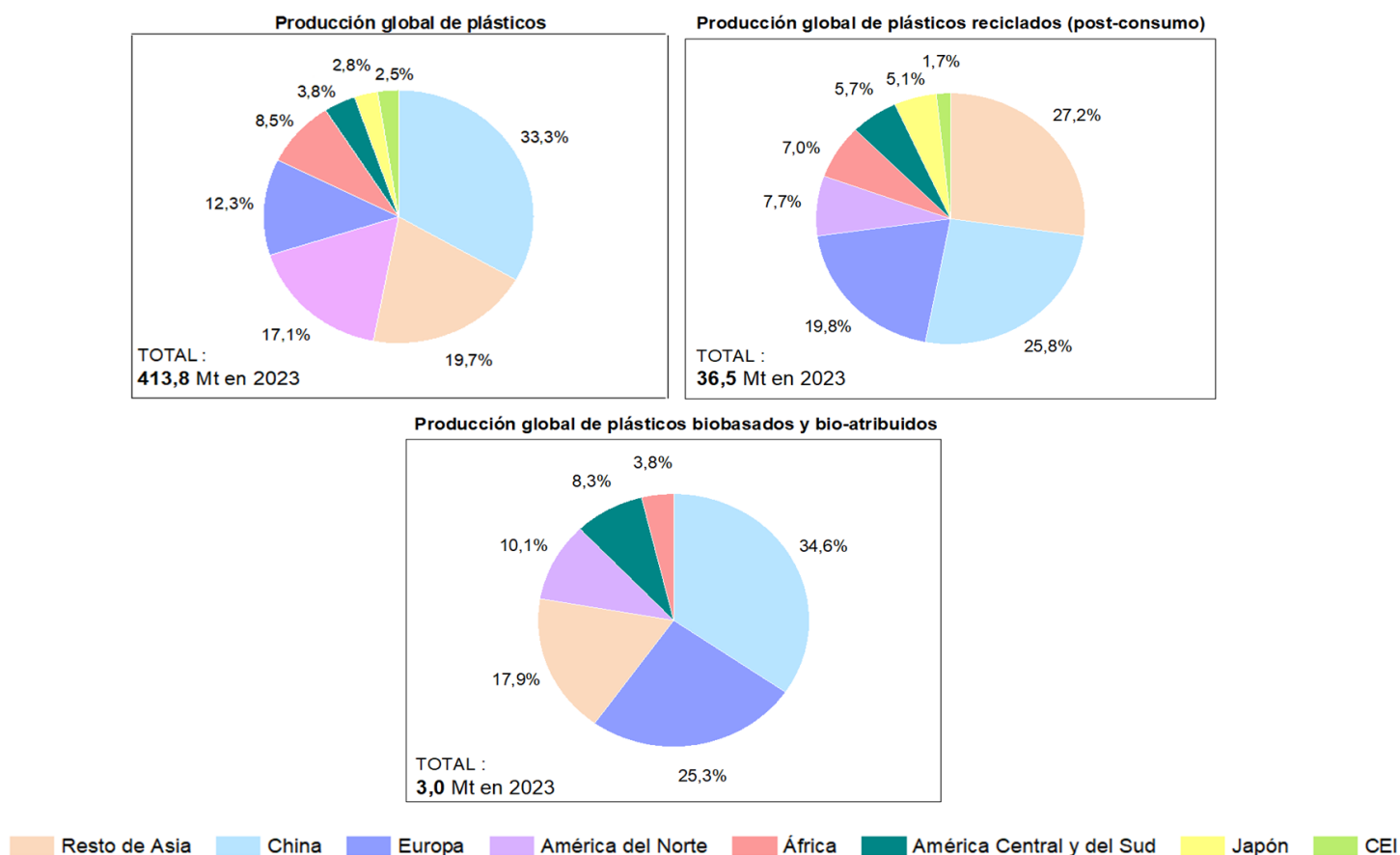


Figura 2. Reparto de la producción mundial de materiales plásticos 2023 según regiones mundiales [2]

2.1.2 Impacto ambiental

A pesar de los avances tecnológicos y la diversificación de los polímeros reciclados y biobasados, la mayor parte de los plásticos producidos en 2023 (alrededor del 90%) todavía tiene su origen en fuentes fósiles, lo que implica un alto consumo de recursos no renovables y una contribución significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Este modelo, predominantemente lineal, basado en "extraer, producir y desechar", genera un enorme volumen de residuos plásticos que, en muchos casos, no se gestionan adecuadamente.

En 2023, se produjeron alrededor de 36,2 millones de toneladas de plásticos reciclados a nivel mundial, lo que representa tan solo un 8,7% del total. Aunque, como hemos podido observar en la Figura 1, esta cifra muestra un incremento con respecto a años anteriores, no es suficiente para contrarrestar la

acumulación de residuos plásticos, que en su mayoría terminan en vertederos, incinerados o contaminando ecosistemas terrestres y marinos. Cada año se vierten al mar más de 8 millones de toneladas de basura, de las que el 80% aproximadamente es plástico, poniendo en riesgo la vida marina y las cadenas tróficas.

Un problema particularmente grave es el de los microplásticos, partículas diminutas de polímeros que se generan tanto por la degradación de plásticos mayores como por fuentes directas, como el lavado de ropa sintética o el uso de cosméticos. Estas partículas han sido encontradas en agua potable, alimentos y organismos vivos, incluida la sangre humana, lo que plantea serias preocupaciones sobre su impacto en la salud [1].

Por otro lado, los esfuerzos para reducir el impacto ambiental impulsan, en regiones como Europa, a implementar políticas más estrictas para limitar el uso de plásticos de un solo uso y fomentar la economía circular. Sin embargo, la transición a modelos más sostenibles sigue siendo lenta. En 2023, los plásticos biobasados y bioatribuidos representaron apenas el 0,8% de la producción mundial, lo que pone de manifiesto la necesidad de mayores inversiones en innovación y adopción de tecnologías sostenibles [2].

Por tanto, actualmente se trabaja en poder satisfacer la creciente demanda global de plásticos intentando a su vez reducir el impacto ambiental que estos generan.

2.2 Clasificación de los polímeros

Los polímeros pueden clasificarse en diversas categorías según su origen, su estructura y el fin de su vida útil. En la Figura 3 se muestra dicha clasificación de los tipos de polímeros según su origen y fin de vida.

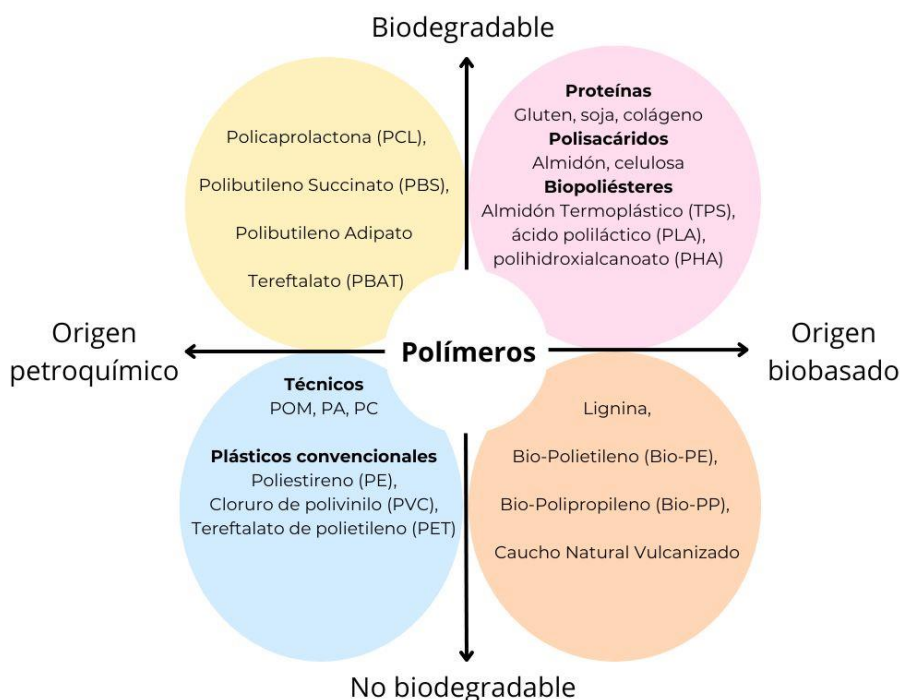


Figura 3. Clasificación polímeros según su origen y fin de vida [3]

2.2.1 Según su origen

Los polímeros pueden dividirse en dos grandes grupos según su procedencia: polímeros biobasados y polímeros de origen petroquímico. La diferencia fundamental entre ambos es la materia prima utilizada en su síntesis y su impacto ambiental.

2.2.1.1 Polímeros biobasados

Los polímeros biobasados provienen de recursos naturales renovables, como aceites vegetales, residuos agroindustriales y otros compuestos de origen natural. Estos materiales se han desarrollado en los últimos años debido a la búsqueda de alternativas más sostenibles que reduzcan la dependencia del petróleo y minimicen la acumulación de residuos petroquímicos en el medioambiente.

Los polímeros biobasados pueden obtenerse a partir de modificaciones químicas de sus precursores naturales como por ejemplo la modificación de aceites vegetales, lo que les permite tener características comparables a las de los polímeros convencionales de origen petroquímico. Además, algunos

2.Introducción

polímeros biobasados pueden ser diseñados para ser biodegradables, lo que facilita su integración en un ciclo de vida sostenible [4].

Polímeros biobasados biodegradables

Los polímeros biobasados biodegradables son aquellos que, además de estar fabricados a partir de fuentes renovables, pueden descomponerse de manera natural mediante la acción de microorganismos en entornos adecuados. Este proceso de degradación permite que los polímeros no se acumulen en el medioambiente y puedan incluso servir como abono para nuevos cultivos cerrando así un ciclo con una baja huella de carbono. Esta clase de polímeros incluye: Ácido poliláctico (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA), almidón termoplástico (TPS), Celulosa regenerada (celofán), entre otros [5].

Polímeros biobasados no biodegradables

Algunos polímeros biobasados a pesar de derivarse de fuentes renovables, presentan estructuras químicas similares a las de los polímeros de origen fósil, lo que impide su biodegradación mediante acción enzimática y genera un problema de residuo ambiental. Dentro de este grupo de biopolímeros se pueden encontrar la lignina, el bio-polipropileno (Bio-PP), bio-polietileno (Bio-PE) o el caucho natural vulcanizado.

Este grupo de polímeros a pesar de generar un residuo ambiental permiten reducir las emisiones de gases de efecto invernadero durante el proceso de producción respecto a la fabricación de polímeros de origen petroquímico.

No obstante, los polímeros biobasados aún presentan ciertos inconvenientes, como la disponibilidad de materia prima o su costo de producción más elevado en comparación con los polímeros sintéticos tradicionales. Sin embargo, su desarrollo sigue avanzando con el objetivo de optimizar su rendimiento y viabilidad económica en aplicaciones comerciales.

2.2.1.2 *Polímeros de origen petroquímico*

Los polímeros de origen petroquímico son aquellos derivados del petróleo y el gas natural. Han sido los más utilizados en la industria debido a su bajo costo, su estabilidad química y su facilidad de producción. Su durabilidad y resistencia han permitido su incorporación en sectores como el embalaje, la construcción, la automoción y la electrónica.

Polímeros de origen petroquímico no biodegradables

A pesar de sus ventajas, este tipo de polímeros presentan un gran problema ambiental ya que se obtienen a partir de origen fósil y además, son productos no biodegradables que favorecen la acumulación de residuos plásticos en el medioambiente. Los plásticos comunes más empleados son: el polietileno (PE), policloruro de vinilo (PVC), polietileno tereftalato (PET) y poliestireno (PS).

Esto ha llevado a intentar buscar estrategias para reducir su impacto, como el desarrollo de procesos de reciclaje más eficientes y la incorporación de aditivos que favorezcan su degradación controlada.

Polímeros de origen petroquímico biodegradables

Estos polímeros se sintetizan a partir de materia prima de origen fósil, no obstante, al tener una determinada estructura química les confiere la capacidad de biodegradarse. Los principales polímeros de origen fósil y con capacidad de biodegradación son: la poli(caprolactona) (PCL), el poli(butilén succinato) (PBS) o poli(butilén adipato-co-tereftalato) (PBAT), entre otros [6].

Un aspecto importante en la evolución de estos polímeros es la formulación de materiales híbridos que combinan polímeros fósiles con biopolímeros o con cargas de origen natural, mejorando así su sostenibilidad sin comprometer sus propiedades mecánicas.

En la Figura 4 se observa la producción de polímeros de origen petroquímico en comparación con los polímeros biobasados donde se llega a la

2.Introducción

conclusión que la producción de polímeros biobasados todavía sigue siendo notablemente más baja que la producción de polímeros de origen fósil.

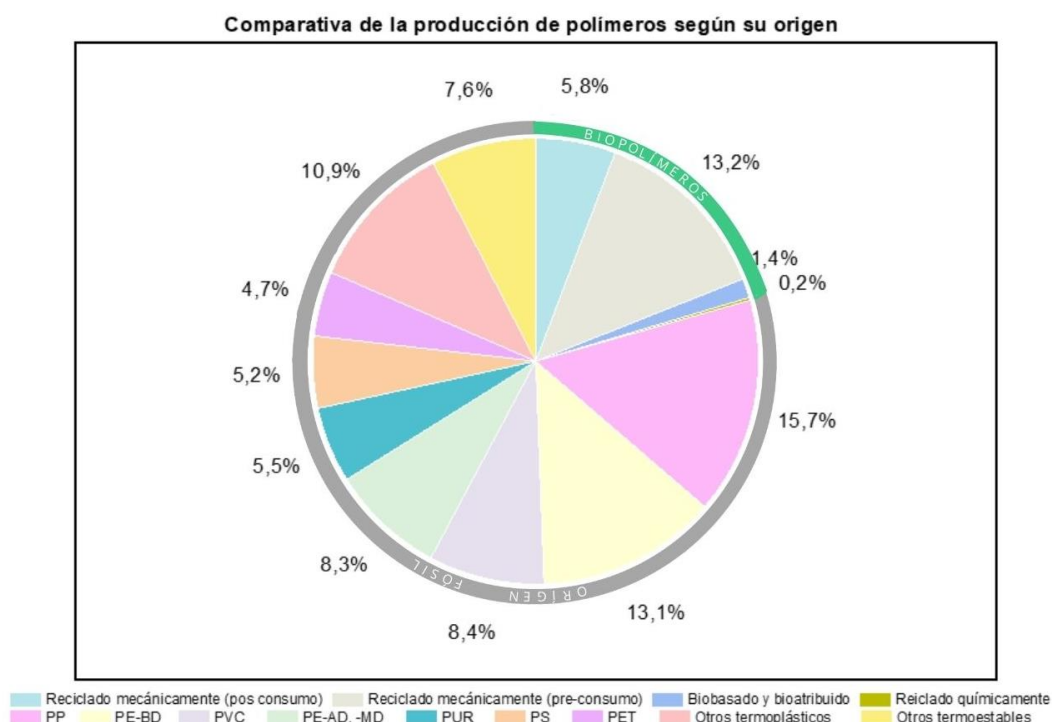


Figura 4. Comparativa de la producción de polímeros de origen fósil y biobasados [2]

2.2.2 Según su estructura

La estructura molecular de un polímero determina su comportamiento físico y mecánico, así como su respuesta a la temperatura y su capacidad de reciclaje. De acuerdo con su estructura, los polímeros pueden clasificarse en termoplásticos y termoestables.

2.2.2.1 Termoplásticos

Los termoplásticos son polímeros cuyas cadenas moleculares no están unidas por enlaces covalentes permanentes, lo que les permite ser fundidos y moldeados repetidamente sin sufrir alteraciones químicas significativas. Esta característica los hace altamente reciclables y versátiles en su procesamiento. En la Figura 5 podemos observar su estructura química.

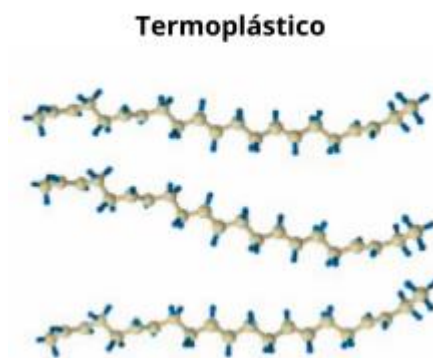


Figura 5. Estructura representativa de un polímero termoplástico [7]

Son utilizados en una gran variedad de aplicaciones debido a su facilidad de manipulación y adaptación a diferentes técnicas de fabricación, como extrusión, moldeo por inyección y termoformado. Además, pueden mezclarse con otros materiales para mejorar sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas [8].

Uno de los objetivos actuales en el uso de termoplásticos es mejorar su compatibilidad con cargas de origen natural y diseñar alternativas más sostenibles que reduzcan su huella ambiental.

2.2.2.2 *Termoestables*

Los polímeros termoestables poseen una estructura reticulada, lo que significa que una vez curados, no pueden volver a fundirse ni reformarse. Esta estructura entrecruzada se puede observar con más claridad en la Figura 6 Esta característica les proporciona una gran estabilidad térmica y mecánica, siendo ideales para aplicaciones en las que se requieren materiales de alta resistencia [8].

Termoestable

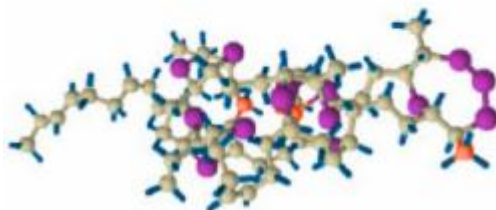


Figura 6. Estructura representativa de un polímero termoestable [7]

Su procesamiento suele implicar reacciones químicas irreversibles, en las que los monómeros forman enlaces cruzados para crear una red tridimensional. Este tipo de polímeros se emplea en sectores como la construcción, la aeronáutica y la fabricación de componentes electrónicos, donde se requiere una elevada resistencia al calor y a los agentes químicos.

Uno de los principales inconvenientes de los termoestables es su dificultad para ser reciclados, lo que ha llevado a investigar nuevas formulaciones basadas en resinas biobasadas que permitan reducir la dependencia de los derivados del petróleo y mejorar su impacto ambiental. Es por ello que se han estudiado diversas estrategias para la obtención de resinas termoestables a partir de aceites vegetales y otros compuestos de origen natural.

2.3 Aceites vegetales en ingeniería

La importancia de los aceites vegetales como materia prima para la obtención de materiales poliméricos ha incrementado considerablemente en los últimos años debido a su abundancia en la naturaleza, coste relativamente bajo y facilidad de modificación química. Su uso permite reducir la dependencia de materiales derivados del petróleo y fomenta el desarrollo de una economía circular más sostenible.

La producción mundial de aceites vegetales ha pasado de aproximadamente 96 millones de toneladas entre los años 2002 al 2003 a más de 199 millones de toneladas en 2017/2018, con una tasa de crecimiento anual del 7% [9].

2.Introducción

Los principales aceites producidos a nivel global son:

Aceite de palma: Principal aceite producido a nivel mundial, con una producción de 69,72 millones de toneladas en 2017/2018, utilizado tanto en alimentación como en la industria química.

Aceite de soja: Con una producción de 55,81 millones de toneladas, es ampliamente utilizado en la fabricación de biodiésel y productos químicos industriales.

Aceite de colza: Producción de 28,75 millones de toneladas, con aplicaciones en lubricantes, biopolímeros y biodiésel.

Aceite de girasol: Con 18,35 millones de toneladas, utilizado en alimentación y bioplásticos.

Cabe destacar que no todos los aceites vegetales se destinan al consumo humano. Aproximadamente un 3,65% de la producción mundial de aceites vegetales se emplea en aplicaciones industriales, como la fabricación de biopolímeros y lubricantes [9].

El consumo de aceites vegetales se ha diversificado más allá del sector alimentario, abarcando aplicaciones en la producción de bioplásticos, resinas epoxi, adhesivos, recubrimientos, plastificantes, lubricantes y biocombustibles.

No obstante, a pesar de ser una alternativa ecológica, existen dilemas éticos en la sociedad. Por un lado, su utilización en la industria desplaza su papel esencial en la alimentación humana, y por otro lado, su coste suele ser más elevado que el de los polímeros de origen fósil, reduciendo actualmente su competitividad en el mercado.

2.3.1 Estructura y propiedades de los aceites vegetales

Los aceites vegetales son lípidos compuestos principalmente por triglicéridos, moléculas formadas por una glicerina unida a tres ácidos grasos. A continuación, en la Figura 7 se muestra un ejemplo de la estructura química de un triglicérido.

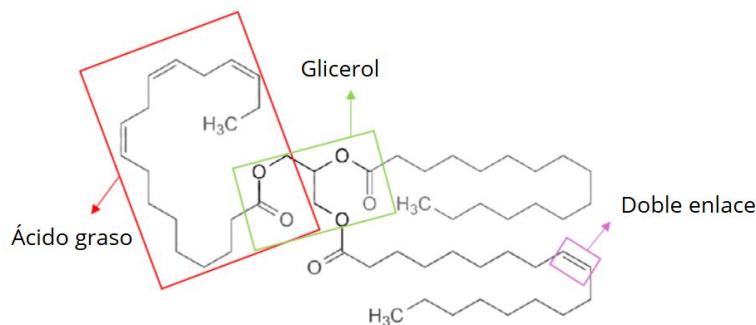


Figura 7. Ejemplo de estructura química del triglicérido

Los ácidos grasos que componen los aceites vegetales pueden ser saturados o insaturados:

- **Ácidos grasos saturados:** No presentan dobles enlaces en su estructura, es por ello que tienen una estructura lineal y recta. Se encuentran en aceites como el de coco y palma.
- **Ácidos grasos insaturados:** Contienen uno o más dobles enlaces en su cadena. Algunos ejemplos incluyen el ácido oleico (monoinsaturado) y el ácido linoleico o linolénico (poliinsaturados), presentes en aceites como el de chía, lino y soja.

La cantidad y tipo de ácidos grasos insaturados en un aceite determina su capacidad de modificación química, ya que los dobles enlaces son los sitios reactivos más importantes para procesos como la epoxidación, la maleinización o la acrilación. La longitud de estos ácidos grasos puede variar entre 14 y 22 átomos de carbono, aunque la mayoría suelen tener entre 16 y 18 átomos.

En la Tabla 1 se muestran algunos de los ácidos grasos que pueden estar presentes en los triglicéridos de los aceites vegetales.

2.Introducción

Tabla 1. Estructura química de los ácidos grasos [10]

Ácidos grasos	Carbones: dobles enlaces	Estructura	Tipo
Mirístico	C14:0	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	Saturado
Palmítico	C16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	Saturado
Palmitoleico	C16:1	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	Insaturado
Margárico	C17:0	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	Saturado
Margaloreico	C17:1	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	Insaturado
Esteárico	C18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	Saturado
Oleico	C18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Insaturado
Linoleico	C18:2	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	Insaturado
Linolénico	C18:3	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	Insaturado
Araquídico	C20:0	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	Saturado
Behénico	C22:0	C ₂₂ H ₄₄ O ₂	Saturado

Entre los ácidos grasos listados, los más relevantes para procesos industriales como la epoxidación son el oleico, linoleico y linolénico, debido a su grado de insaturación y elevada presencia en aceites vegetales.

2.3.2 Modificaciones químicas

Como hemos mencionado en el apartado anterior, los aceites vegetales pueden ser modificados químicamente, sobre todo los que más insaturaciones tengan para mejorar su compatibilidad con matrices poliméricas y optimizar sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas y así poder ampliar sus aplicaciones en la industria de los polímeros. Estas modificaciones permiten obtener compuestos con mayor reactividad, facilitando la fabricación de bioplásticos, resinas termoestables y plastificantes sostenibles.

Entre los principales procesos utilizados para modificar aceites vegetales destacan la epoxidación, maleinización, acrilación y transesterificación, cada uno con aplicaciones específicas. En este trabajo se pretende emplear los dos primeros procesos para la modificación química de un aceite vegetal.

Epoxidación

La epoxidación es un proceso químico en el cual se incorpora un grupo epoxi (C-O-C) en un doble enlace (C=C) del triglicérido. Con lo cual, una mayor cantidad de insaturaciones en el aceite implicará una mayor cantidad de grupos epoxi que puedan introducirse y por tanto implicará una mayor interacción entre el aceite modificado y su posterior aplicación.

Aunque existen diferentes métodos para la epoxidación del aceite, el más común y el empleado en este trabajo es el método Prilezhaev. Este, consiste en hacer reaccionar un ácido peroxicarboxílico con los dobles enlaces de un compuesto insaturado, en este caso, los triglicéridos del aceite vegetal. La reacción se basa en la adición de oxígeno a los dobles enlaces carbono-carbono (C=C), formando anillos epoxi [11]. El ácido peroxicarboxílico se genera comúnmente in situ, a partir de una reacción entre peróxido de hidrógeno y un ácido orgánico (como ácido acético). Una vez generado, el ácido peroxicarboxílico ataca los dobles enlaces del aceite, insertando un oxígeno y formando el anillo epoxi [11].

El proceso de formación de perácidos tiende a ser lento, por lo que se requiere de catalizadores como el ácido sulfúrico. En la Figura 8 se puede observar de manera más esquemática la reacción de epoxidación.

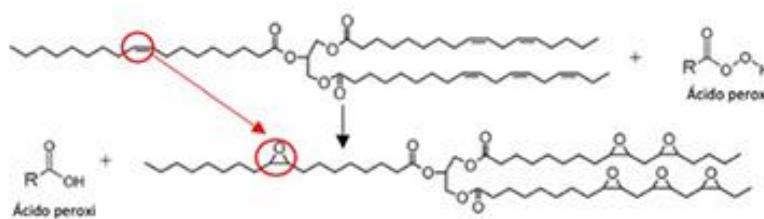


Figura 8. Esquema de la reacción de epoxidación [12]

Maleinización

La maleinización de aceites vegetales es un proceso en el cual el anhídrido maleico reacciona con los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados mediante dos mecanismos principales: la reacción de Diels-Alder y la adición electrofílica. En la primera, el anhídrido maleico actúa como un

2.Introducción

dienófilo que se une al doble enlace del ácido graso formando un anillo de cinco miembros. En la segunda, el anhídrido maleico se adiciona directamente al doble enlace generando grupos anhídrido y carboxilo (-COOH), lo que aumenta la polaridad del aceite y mejora su compatibilidad con polímeros. Posteriormente, estos grupos funcionales pueden interactuar con otras moléculas poliméricas mediante enlaces covalentes, favoreciendo la reticulación en resinas termoestables, siendo posible la utilización de resinas de este tipo como endurecedor completamente de origen bio. Este proceso se observa de manera más visual en la Figura 9.

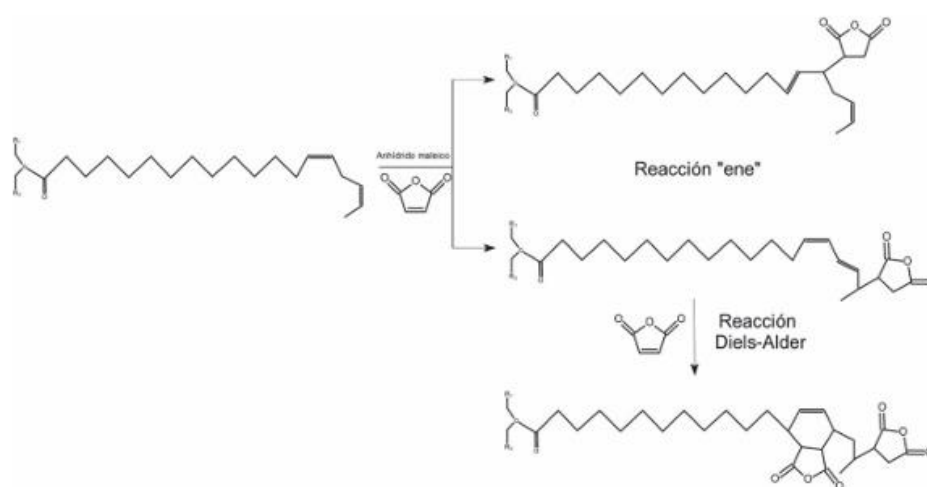


Figura 9. Reacción de maleinización [13]

2.3.3 Usos y aplicaciones de los aceites vegetales modificados

En el sector de los biopolímeros y plásticos biodegradables, se emplean como plastificantes en materiales como PLA y PHA, mejorando su flexibilidad sin comprometer su biodegradabilidad. También actúan como compatibilizantes en mezclas poliméricas, favoreciendo la adhesión entre matrices poliméricas y cargas naturales en la producción de biocomposites [14].

En la fabricación de resinas termoestables y adhesivos, los aceites epoxidados se utilizan como base para resinas epoxi biobasadas en adhesivos y recubrimientos de alto rendimiento. Además, los aceites maleinizados y

2.Introducción

acrilados son empleados en la producción de resinas poliéster y poliuretanos biobasados, con aplicaciones en la industria automotriz y de la construcción [3].

Dentro del ámbito de los recubrimientos, barnices y tintes, los aceites vegetales modificados permiten la formulación de pinturas ecológicas con bajas emisiones de compuestos volátiles, así como tintas sostenibles con mejor adherencia y durabilidad en aplicaciones gráficas y textiles.

En el desarrollo de biocomposites avanzados, los aceites maleinizados y epoxidados se utilizan como matrices en composites reforzados con fibras naturales, especialmente en sectores como la construcción y la automoción. También han demostrado su eficacia en la fabricación de espumas biodegradables y poliuretanos biobasados con aplicaciones en embalaje y aislamiento térmico.

La industria cosmética y biomédica ha incorporado aceites modificados como sustitutos de siliconas y emolientes en formulaciones de cremas, lociones y productos capilares de menor impacto ambiental [14]. Además, las resinas fotopolimerizables derivadas de aceites epoxidados están siendo exploradas en la impresión 3D de prótesis y dispositivos médicos personalizados.

Los aceites vegetales modificados han ampliado su campo de aplicación en múltiples industrias, promoviendo alternativas sostenibles alineadas con la economía circular y la reducción de la dependencia de polímeros de origen fósil.

2.4 Producción mundial de cáñamo

El *Cannabis sativa* L., comúnmente conocido como cáñamo, sitúa sus orígenes en Asia Central, donde crecía de forma silvestre antes de ser cultivada. Desde allí se extendió progresivamente hacia Europa, Oriente Medio y posteriormente América. En España, el cáñamo llegó a través de las rutas comerciales y en algunos sitios como en Galicia aún puede encontrarse [15].



Figura 10. Semilla de cáñamo (*Cannabis sativa* L.)

La producción global de cáñamo ha estado históricamente restringida debido a regulaciones sobre el cultivo de *Cannabis sativa* L. Sin embargo, en la última década, se ha observado un crecimiento significativo debido a la flexibilización de las políticas regulatorias en países clave, especialmente en Estados Unidos y Europa.

La aprobación de la Ley Agrícola (Farm Bill) de 2014 permitió el cultivo de cáñamo industrial en Estados Unidos para fines de investigación y posteriormente la Ley Agrícola de 2018 amplió las disposiciones para permitir el cultivo comercial de cáñamo [15].

En la década de 1960, el cultivo de cáñamo cubría aproximadamente 473.273 hectáreas a nivel mundial. Sin embargo, la superficie cultivada se redujo drásticamente en las décadas siguientes, alcanzando su punto más bajo en 1995. Desde entonces, la superficie global dedicada al cáñamo se ha mantenido relativamente estable entre 50.000 y 60.000 hectáreas anuales. Según datos de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) y de la base de datos Agreste, la superficie cultivada en 2021 fue de aproximadamente 48.860 hectáreas.

La producción mundial de cáñamo está concentrada principalmente en tres regiones:

2.Introducción

Asia cuya región aporta alrededor del 40% de la producción global, con China como el mayor productor. Europa que contribuye con aproximadamente el 30% de la producción global, Países Bajos liderando la producción y América que representa alrededor del 20% de la producción, siendo Canadá y Estados Unidos los mayores productores.

Como se ha comentado anteriormente, en Europa uno de los países que lideran la producción de cáñamo son los Países Bajos, seguidos por Italia, Luxemburgo y Suiza. En la Figura 11 se pueden ver los principales países exportadores de cáñamos en Europa.

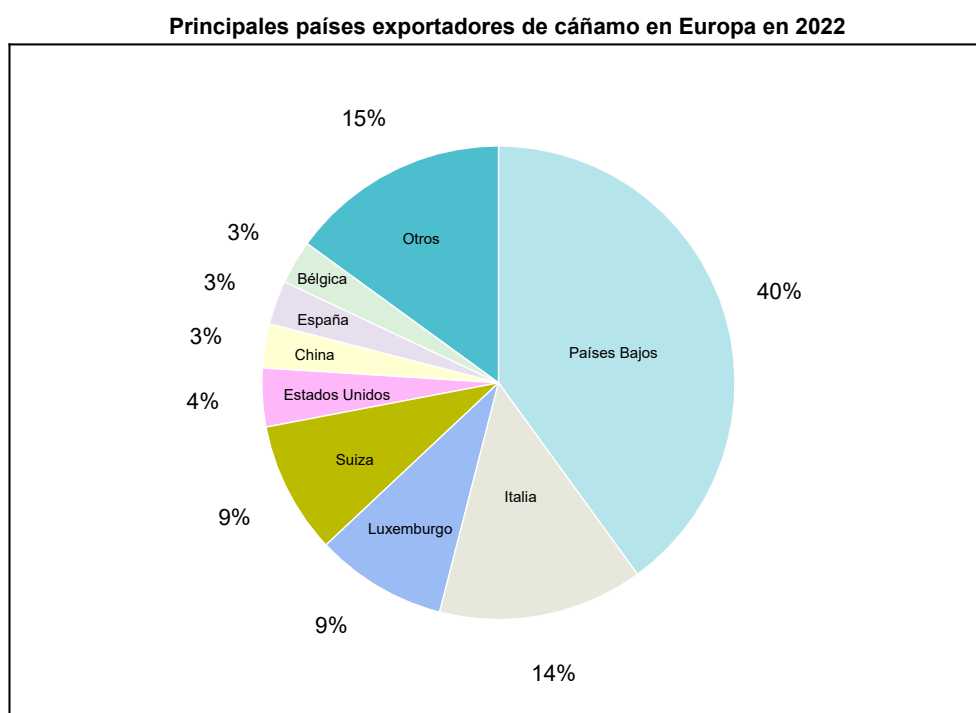


Figura 11. Principales países exportadores de cáñamo en Europa en 2022 [13]

El auge en la producción de cáñamo industrial ha sido impulsado por diversos factores que han favorecido la expansión y aceptación de este cultivo a nivel mundial. Uno de los principales factores es la sostenibilidad y el bajo impacto ambiental del cáñamo. Esta planta requiere aproximadamente 2,5 veces menos agua que el algodón para producir la misma cantidad de fibra, lo que lo convierte en una alternativa eficiente y sostenible para la industria textil y de materiales de construcción. Además, el cáñamo tiene la capacidad de crecer en una amplia variedad de suelos, incluyendo aquellos de baja calidad, y puede adaptarse a diferentes condiciones climáticas, lo que facilita su cultivo en

2.Introducción

diversas regiones del mundo [16]. Otra ventaja ambiental es la capacidad del cáñamo para realizar fitorremediación, es decir, absorber metales pesados y carbono del suelo, ayudando a mejorar su calidad y reduciendo la contaminación ambiental [17].

A pesar del crecimiento sostenido en la producción y comercialización de cáñamo industrial, la industria aún enfrenta varios desafíos que limitan su expansión global. Uno de los principales obstáculos son las limitaciones regulatorias. El contenido de THC permitido para el cáñamo industrial varía entre países, lo que dificulta la estandarización de los procesos de cultivo y comercialización. En Estados Unidos, el límite máximo de THC es de 0,3%, mientras que en Europa es de 0,2%. Esta diferencia crea dificultades para la exportación y el comercio internacional, además de generar riesgos legales para los productores [18].

Otro desafío importante es la falta de tecnología especializada para el cultivo y procesado de cáñamo. La recolección y posterior elaboración de cáñamo requieren equipos específicos debido a la resistencia de las fibras y la fragilidad de las semillas. La falta de inversión en maquinaria agrícola especializada ha limitado la capacidad de los productores para aumentar el rendimiento y mejorar la eficiencia en la producción [15]. Además, las máquinas de recolección y procesado utilizadas en la industria textil y de alimentos no están diseñadas para trabajar con cáñamo, lo que genera pérdidas y limita la calidad del producto final [13].

No obstante, la industria de cáñamo presenta importantes oportunidades de crecimiento y desarrollo en los próximos años. El mercado de cáñamo industrial está proyectado para crecer a una tasa compuesta anual (CAGR) de aproximadamente 12,8% entre 2019 y 2025, alcanzando un valor de mercado de hasta 9,4 mil millones de dólares en 2025. Este crecimiento está siendo impulsado por la expansión de la producción en Asia y América Latina, donde las condiciones climáticas y las reformas regulatorias están permitiendo el desarrollo de nuevas plantaciones [17].

Las innovaciones tecnológicas en la industria de procesamiento y la mejora de las técnicas de cultivo también están abriendo nuevas oportunidades

2.Introducción

para la industria del cáñamo. La introducción de maquinaria especializada para la recolección y el procesamiento de fibras y semillas está mejorando el rendimiento y reduciendo los costos de producción. Además, la investigación en genética y biotecnología está permitiendo el desarrollo de variedades de cáñamo con mayor contenido de proteínas y aceites saludables, lo que está aumentando la competitividad del cáñamo frente a otros cultivos industriales [19].

Las semillas de cáñamo presentan una variedad de propiedades ecológicas, farmacéuticas y agronómicas que le permiten ser una materia prima ideal para diferentes aplicaciones industriales tradicionales como la producción de fibras, alimentación o extracción de aceites, así como otras aplicaciones más novedosas como la producción de biomateriales o biocombustibles.

2.4.1 Propiedades

El cáñamo posee grandes cantidades de fibra, aceite, proteínas y humedad con contenidos comprendidos entre 30 - 40%, 20 - 30%, 25% y 5% respectivamente [16]. El aceite normalmente se extrae de las semillas de la planta de cáñamo mediante procesos mecánicos, como el prensado en frío. En cuanto a la fracción lipídica, el ácido graso mayoritario es el ácido linoleico, que representa más de la mitad del total de ácidos grasos. Además, destaca su contenido de ácido alfa-linolénico y ácido oleico, ambos en torno al 16% del total de ácidos grasos.

A continuación, en la Tabla 2 se muestra la composición de los principales ácidos grasos que forman el aceite de semilla de cáñamo.

Tabla 2. Principales ácidos grasos del aceite de cáñamo [13]

Ácidos grasos	Cáñamo (% en peso)
Palmítico (16:0)	5,60
Esteárico (18:0)	3,90
Oleico (18:1)	16,20
Linoleico (18:2)	54,70
A-Linoleico (18:3)	16,20
Araquídico (20:0)	0,90

2.Introducción

En el cáñamo no solo se aprovecha el aceite tras la extrusión de la semilla, sino que también se hace uso de la harina proveniente de la cáscara tras el proceso de extrusión. Esta harina está compuesta principalmente por proteínas, fibra y carbohidratos, de los cuales estos últimos se dividen en sacarosa, glucosa y fructosa.

Es por ello que el crecimiento del mercado de productos sostenibles y la transición hacia una economía circular están posicionando al cáñamo como un cultivo estratégico para el futuro [15].

2.5 Materiales compuestos tipo WPC (Wood Plastic Composite) y NFRP (Natural Fiber Plastic Composite)

Los WPC son una subcategoría de los NFC. Se trata de materiales compuestos por una parte vegetal proveniente de la madera y otra polimérica (plásticos reciclados o vírgenes) para obtener un compuesto con buenas propiedades estructurales, con más durabilidad y resistencia que la madera tradicional. Los plásticos suelen ser restos de polipropileno y polietileno reciclado de empresas dedicadas a la transformación de plásticos como botellas, bolsas, etc. Los polímeros más comúnmente utilizados en la fabricación de WPC son: Polipropileno (PP), Polietileno (PE), Policloruro de vinilo (PVC), harina de madera y fibra celulósica. En la Figura 12 observamos un ejemplo de WPC.



Figura 12. WPC de distintos acabados finales [20]

2.5.1 Propiedades

Existen diferentes limitaciones en cuanto a su uso, ya que no alcanzan la rigidez de la madera, presentan una baja resistencia al impacto, tienen elevada facilidad de fracturarse y una reducida capacidad de soportar cargas en referencia a propiedades mecánicas, así como la inflamabilidad de estos con una exposición continua a una llama sin un tratamiento con aditivos previo.

Dependiendo del uso que se le vaya a otorgar al producto y en función si será aplicado en el exterior o en interior las propiedades variarán. Sin embargo, en el caso de terrazas exteriores, si se necesita mayor rigidez, se pueden reforzar aumentando el espesor o ajustando el diseño.

Los WPC presentan ciertas ventajas frente a aquellos materiales constituidos por la madera natural que los convierten en una alternativa cada vez más utilizada [21].

Estos absorben menos humedad que la madera, a diferencia de esta, este tipo de materiales presenta una elevada resistencia frente a ataques de hongos, insectos y termitas entre otros.

Requieren un mantenimiento mínimo, sin necesidad de barnices ni ceras, y basta con una limpieza periódica con agua. Además, resisten bien las condiciones climáticas extremas, siendo aptos para exteriores expuestos al sol, la lluvia o cambios bruscos de temperatura. Tienen una baja absorción de humedad, evitando deformaciones o propiedades deslizantes.

Ofrecen gran versatilidad estética, ya que se pueden fabricar en una amplia gama de colores y acabados, imitando incluso vetas de madera natural.

Asimismo, se fabrican a partir de materiales reciclados y también son reciclables, igualmente su ligereza facilita el transporte y la instalación, reduciendo los costes logísticos lo que reduce su impacto ambiental y los hace más sostenibles.

En este contexto, el presente trabajo se centra en el desarrollo y caracterización de materiales poliméricos sostenibles basados en aceite de cáñamo modificado químicamente. Concretamente, empleando aceite de

2.Introducción

cáñamo epoxidado (EHO) combinado con un endurecedor de Epoxy Embedding Medium (MNA) y aceite de cáñamo maleinizado (MHO) para estudiar su capacidad de reticulación y propiedades mecánicas, analizando el efecto de la adición de diferentes porcentajes de cáscara de cáñamo como carga natural en la matriz polimérica, con el objetivo de mejorar sus propiedades estructurales y térmicas. El material desarrollado está pensado específicamente para su aplicación en suelos exteriores, donde se requiere buena resistencia mecánica, durabilidad a la intemperie y bajo mantenimiento.

Este estudio busca ofrecer una alternativa viable y sostenible a los polímeros de origen fósil, promoviendo el uso de materiales biobasados y reutilizando residuos agroindustriales como la cáscara de cáñamo. Reduciendo la huella de carbono ambiental y promoviendo la economía circular en la industria de materiales compuestos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo general desarrollar y caracterizar un material polimérico termoestable biobasado, mediante la modificación química del aceite de cáñamo, combinando también un endurecedor de origen bio junto con uno petroquímico y un catalizador, así como la incorporación de cáscara de cáñamo como carga lignocelulósica para posteriormente producir una cantidad de 40 baldosas al día con el fin de estudiar la viabilidad económica para darle una salida al termoestable con un elevado contenido bio y favorecer la revalorización de subproductos agroindustriales.

3.2 Objetivos particulares

Para poder alcanzar el objetivo general es necesario llevar a cabo una serie de objetivos particulares:

- Extracción del aceite de cáñamo.
- Modificación química del aceite de cáñamo y posterior optimización del proceso.
- Desarrollo de una matriz polimérica termoestable.
- Caracterización del termoestable obtenido experimentalmente.
- Comparación del material biobasado obtenido con otros de origen petroquímico.
- Diseño y dimensionado de equipos necesarios para el proceso.
- Desarrollo industrial considerando aspectos técnicos como equipos, distribución, materias primas y procesos.
- Estudio económico del proceso industrial calculando factores clave como el VAN y TIR.

Estos objetivos particulares se pueden observar de una forma más clara y visual en la Figura 13.

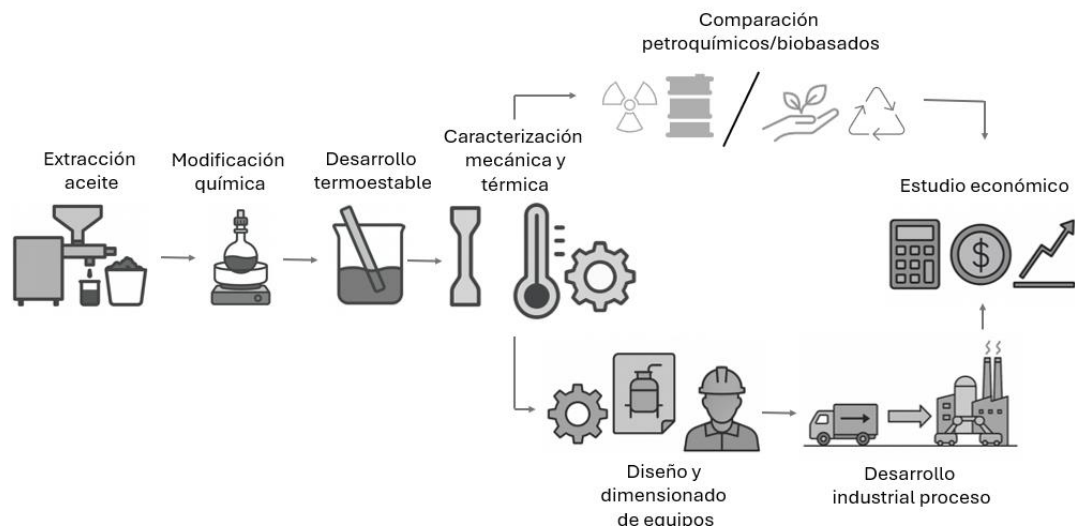


Figura 13. Objetivos particulares del trabajo

3.3 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

En la Tabla 3 se resumen todos los ODS planteados en la Agenda 2030, así como se diferencian los que tienen un grado de relación relevante en el actual proyecto.

Se considera que los ODS 8, 9, 12 y 13 son los que adquieren una mayor influencia o impacto en el trabajo realizado.

En cuanto al objetivo 8, el desarrollo de nuevos materiales poliméricos de alto valor añadido, obtenidos mediante tecnologías de modificación química (epoxidación y maleinización) aplicadas al aceite de cáñamo suponen una apuesta por la innovación industrial y permiten la valorización de recursos naturales infrautilizados. Este proyecto afecta pues a la meta 8.2 estipulada al promover el crecimiento económico a través estas tecnologías. Además, en relación con la meta 8.4, este desarrollo promueve la mejora de producción y el consumo eficiente de recursos naturales, tratándose en este caso tanto del aceite como los residuos sólidos (cáscara) de la semilla de cáñamo.

Respecto al objetivo 9, el desarrollo de nuevos materiales poliméricos contribuye a la meta 9.4 al promover la modernización de procesos industriales mediante el uso de tecnologías limpias y sustituir materiales de origen fósil por polímeros bio-basados, mejorando la eficiencia en el uso de recursos y

3.Objetivos

reduciendo las emisiones contaminantes. Por otro lado, se fomenta la investigación aplicada y el desarrollo experimental de nuevos materiales y procesos, apoyando así la innovación tecnológica y científica en el ámbito de los biopolímeros según indica la meta 9.5.

Tabla 3. Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza				X
ODS 2. Hambre cero				X
ODS 3. Salud y bienestar				X
ODS 4. Educación de calidad				X
ODS 5. Igualdad de género				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico	X			
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles				X
ODS 12. Producción y consumos responsables	X			
ODS 13. Acción por el clima	X			
ODS 14. Vida submarina				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos				X

El objetivo 12 también se muestra afectado por el desarrollo de nuevos materiales poliméricos. En lo referente a la meta 12.2, se contribuye a un consumo eficiente de los recursos naturales mediante la utilización integral de la semilla de cáñamo, aprovechando tanto el aceite extraído como la cáscara

residual para la formulación de materiales compuestos. En cuanto a la meta 12.4, el uso de materias primas de origen vegetal y técnicas de modificación química sostenibles contribuyen a una gestión ambientalmente racional de los productos químicos durante todo su ciclo de vida. Por último, la meta 12.5 se cumple al promover la revalorización de subproductos agroindustriales que, en otro contexto, serían descartados, lo que permite disminuir la cantidad de residuos generados mediante su transformación en materiales funcionales y duraderos.

Finalmente, el objetivo 13 se encuentra, asimismo, influido en gran medida por el proceso estudiado ya que reduce de manera significativa los impactos ambientales al sustituir materiales de origen fósil por polímeros desarrollados a partir de aceites vegetales como el cáñamo (meta 13.2). Además, al emplear residuos agroindustriales como la cáscara de cáñamo, se fomenta un modelo de economía circular que contribuye a disminuir el volumen de desechos y a optimizar el uso de recursos renovables.

4 Desarrollo del proyecto

En el presente trabajo se describen los pasos realizados para desarrollar un material polimérico termoestable parcialmente biobasado, empleando aceite y subproductos del cáñamo (*Cannabis sativa L.*). El proceso se basa en la valorización integral de la semilla de cáñamo, mediante la extracción de su aceite por prensado en frío y la posterior modificación química a través de las reacciones de epoxidación y maleinización, con el objetivo de obtener dos tipos de resinas: una base epoxi y un endurecedor bioalternativo.

La epoxidación del aceite permite introducir grupos epoxi en los ácidos grasos insaturados, confiriéndole al aceite una alta reactividad. Por otro lado, la maleinización incorpora grupos anhídros y carboxilos al aceite, para mejorar su compatibilidad química como componente de curado y actuar como endurecedor de origen renovable. Ambos procesos se explicarán con detalle incluyendo los materiales, los reactivos y los equipos necesarios que se han utilizado para su correcta ejecución, desde la extracción del aceite hasta su modificación química.

Además, se ha incorporado la cáscara de cáñamo, subproducto sólido resultante de la extracción del aceite, como carga vegetal lignocelulósica en diferentes proporciones dentro de la matriz polimérica, para analizar su efecto sobre las propiedades del material final.

Posteriormente, se describen las técnicas de caracterización, tanto mecánicas (dureza y Charpy), físicas (absorción de agua) y térmicas (DSC) que permitirán evaluar y comparar las propiedades de cada material con diferente carga lignocelulósica.

Finalmente, se escogerá el material con mejores propiedades para el escalado industrial y el estudio de viabilidad económica para su producción.

4.1 Materiales

Para este trabajo se emplearon semillas de cáñamo que se adquirieron en un mercado local de Canals (València, España). Asegurando que toda la semilla provenía del mismo origen.

Los reactivos utilizados en el proceso de epoxidación son:

- Ácido acético glacial (Nº CAS: 64-19-7), 99,7% wt.
- Peróxido de hidrógeno (Nº CAS: 7722-84-1), 30% wt.
- Ácido sulfúrico (Nº CAS: 7664-39-9), 95-97% wt.

En las técnicas de caracterización del aceite epoxidado, los reactivos utilizados en la valoración de determinación de oxígeno oxiránico son:

- Clorobenceno (Nº CAS:108-90-7) anhídrido 99,8% wt.
- Ácido acético glacial (Nº CAS:64-19-7), 99,7% wt.
- Indicador cristal violeta (Nº CAS:548-62-9).
- Ftalato de ácido de potasio (Nº CAS:877-24-7).
- Bromuro de hidrógeno (Nº CAS:10035-10-6) 33% wt. en ácido acético.

Los reactivos utilizados en el proceso de maleinización son:

- Anhídrido maleico (Nº CAS: 110-16-7), 99,5% wt.

Los reactivos del proceso de formación del polímero termoestable son:

- 1-metilimidazol (Nº CAS: 616-47-7), 99% wt.
- Glicerol (Nº CAS: 56-81-5), 99% wt.
- Anhídrido metil nádic (MNA, Nº CAS: 25134-21-8), 99% wt.
- Aceite de semilla de cáñamo maleinizado (MHO).
- Aceite de semilla de cáñamo epoxidado (EHO).
- Cáscara de cáñamo (FHO).

Todos estos reactivos se han adquirido de Sigma-Aldrich (Sigma-Aldrich química, S.S. Madrid, España), donde se puede encontrar todas las características de estos reactivos de forma más detallada.

4.2 Procedimiento experimental

En el presente apartado se describen las diferentes técnicas de procesado empleadas, así como las condiciones de trabajo óptimas para llevar a cabo el proyecto.

4.2.1 Obtención del aceite de cáñamo

Antes de comenzar con el proceso de epoxidación y maleinización se debe extraer el aceite de la semilla de cáñamo y posteriormente limpiarlo mediante centrifugación.

4.2.1.1 Extrusión del aceite de cáñamo

Existen diferentes formas de realizar la extrusión: Prensado en frío o en caliente [22], con solventes [23] o con fluidos súpercríticos [24].

En este trabajo se decidió realizar la extrusión mediante prensado en frío, siendo la forma más económica y la opción más sostenible de las tres, ya que al no emplear disolventes orgánicos estos no deben ser recuperados y por tanto no encarece el proceso y al no utilizar solventes adicionales se evita generar un residuo dañino para el medio ambiente.

Para realizar el prensado se utilizó una extrusora del modelo.DL-ZYJ05 suministrada por Nanchang Dulong Industrial Co. Ltd, (Jiangxi, China) como se muestra en la Figura 14. Aunque esta extrusora permite trabajar tanto en caliente como en frío, se decidió realizar la extracción en frío para evitar alterar la composición natural de los ácidos grasos.

4.Desarrollo del proyecto



Figura 14. Partes de la extrusora de prensado en frío

En primer lugar, se introducen las semillas de cáñamo por la tolva de alimentación, teniendo en cuenta no obstruir el contacto para evitar que se atasque el husillo. La cáscara de cáñamo saldrá por el final del husillo, mientras que el aceite saldrá por la mitad del husillo, donde se colocará un colador para separar los sólidos más gruesos del aceite. A continuación, se volverá a meter en la tolva la cáscara obtenida tras la primera extrusión para poder extraer la máxima cantidad de aceite.

4.2.1.2 Centrifugación del aceite extruido

Una vez extruido el aceite de las semillas de cáñamo, el propio aceite se centrifuga para decantar los sólidos y obtener un aceite purificado y asegurarse una correcta epoxidación y maleinización posterior.

Para poder separarlo de manera correcta se hizo uso de una centrifugadora modelo Medibas 2740 obtenida por Nahita mostrada en la Figura 15. Se emplearon tubos de ensayo de 12 ml que se distribuyeron de manera equidistante dentro de la centrífuga para garantizar el equilibrio del rotor durante el giro y se fijaron unas condiciones de trabajo de 4000 rpm durante 10 minutos.

4.Desarrollo del proyecto



Figura 15. Máquina centrífuga

4.2.1.3 Proceso de epoxidación

Para llevar a cabo el proceso de epoxidación previamente se necesita preparar un montaje experimental, el cual queda descrito en la Figura 16.

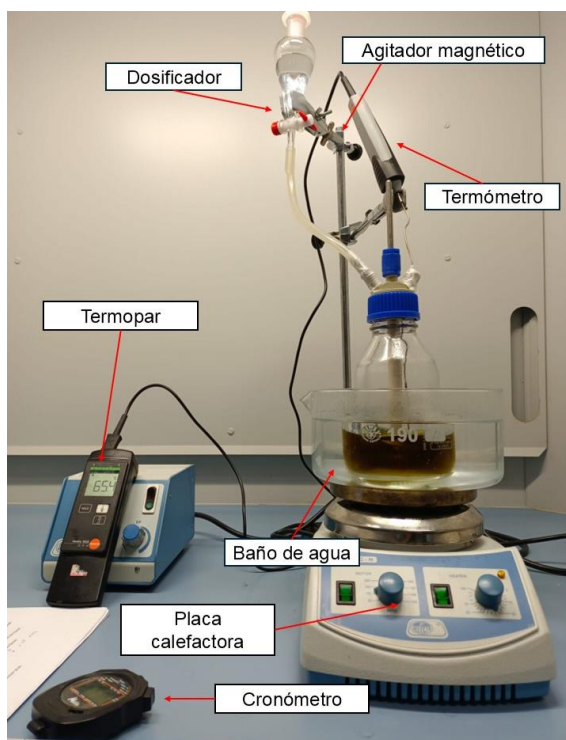


Figura 16. Montaje experimental del proceso de epoxidación

Por una parte, se destina el orificio izquierdo para añadir los reactivos mediante un dosificador. El orificio del centro va previsto de una barra de agitación magnética. Mientras que el orificio de la derecha se destina para el

4.Desarrollo del proyecto

termómetro conectado a un termopar para poder observar la temperatura del interior del reactor donde se produce la reacción y hacer posibles correcciones manuales con el fin de mantener la temperatura de 70-75 °C. El reactor se introduce en un baño de agua calentado por un agitador magnético con placa calefactora. Además, se requiere de un cronómetro para controlar el tiempo de reacción (8 horas), así como la toma de muestra cada hora.

El procedimiento a seguir una vez se ha realizado el montaje experimental sería:

En primer lugar, introducir 100 g de aceite de cáñamo en el baño de agua hasta alcanzar una temperatura de 70 °C. Una vez se alcanza la temperatura deseada añadir 15,9 ml de ácido acético (CH_3COOH), calculado a partir de la cantidad de dobles enlaces presentes en el aceite. Seguidamente, añadir una mezcla de 114 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y 0,61 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4). El proceso de adición se realiza lentamente durante un periodo de 30 minutos para controlar la temperatura adecuadamente en el aceite de 70 °C y la reacción se desarrolle correctamente, puesto que se produce una reacción exotérmica en el interior del reactor. Después de añadir todos los reactivos, se deja en agitación durante 8 horas, sacando muestra del aceite cada hora para posteriormente medir la evolución de oxígeno oxiránico durante la reacción.

Tras realizar el proceso de epoxidación en el reactor, la mezcla se vierte en un embudo de decantación y se deja reposar hasta alcanzar la temperatura ambiente, produciéndose una separación de fases entre la parte acuosa y el aceite epoxidado, tal y como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Embudo de decantación aceite de cáñamo epoxidado

Para asegurarse que se separa correctamente la fase acuosa del aceite se somete a un proceso de centrifuga con las mismas condiciones y el mismo equipo descrito en el apartado anterior.

4.2.1.4 Proceso de maleinizado

Al igual que para el proceso de epoxidación, para la maleinización se debe preparar un montaje con un reactor de 3 cuellos, cada uno también destinado a una función específica, dentro de una manta calefactora. En el cuello de la izquierda se dispone un termómetro para poder medir la temperatura dentro del reactor durante todo el proceso. En el cuello central colocar el agitador y el cuello de la derecha se destina a la adición del anhídrido maleico y para la recogida de muestras. En la Figura 18 podemos observar el montaje experimental.

4.Desarrollo del proyecto

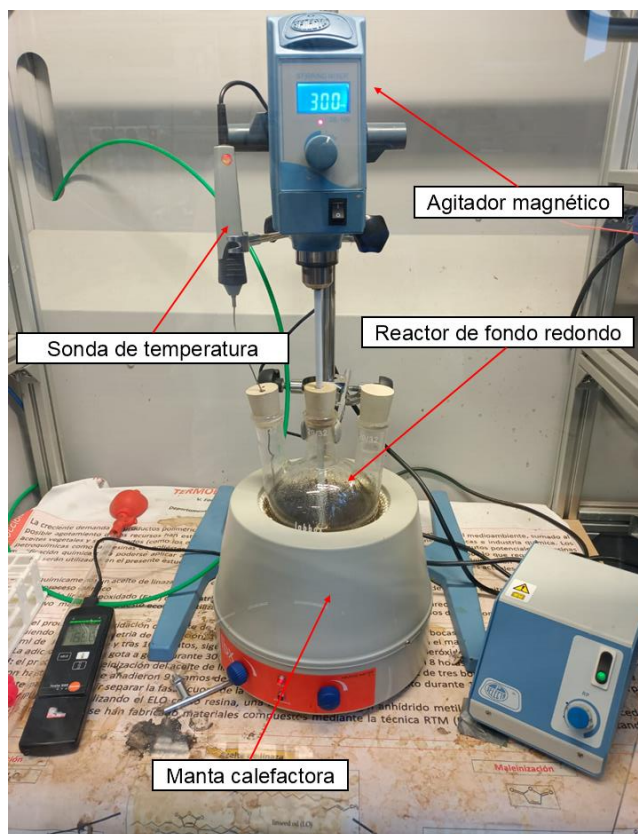


Figura 18. Montaje experimental de la maleinización de aceite de cáñamo.

Se debe trabajar en campana de gases y asegurarse de que los orificios del reactor estén cerrados ya que el proceso de maleinización es exotérmico y se produce liberación de gases.

Una vez el montaje experimental está listo, añadir 300 g de aceite virgen al reactor de fondo redondo y calentar hasta 180 °C a la vez que se agita a 300 rpm. Una vez se alcanza la temperatura deseada, añadir 9 g de anhídrido maleico por cada 100 g de aceite virgen, en este caso se añaden 27 g de anhídrido maleico (ya que se introducen 300 g de aceite virgen) y mantener en agitación una hora. Al cabo de ese tiempo introducir otros 27 g de anhídrido al reactor y subir la temperatura a 200 °C durante otra hora. Por último, volver a introducir una tercera cantidad de 27 g de anhídrido maleico y elevar la temperatura hasta 220 °C también durante una hora. Finalmente dejar enfriar a temperatura ambiente. Durante el proceso se deben extraer muestras cada hora para poder caracterizar el aceite posteriormente.

4.Desarrollo del proyecto

4.2.2 Técnicas de caracterización del aceite epoxidado y maleinizado

Para saber que el aceite se ha modificado químicamente de manera correcta y que el rendimiento del proceso es el adecuado, se realizan una serie de mediciones que se describen a continuación.

4.2.2.1 Determinación del oxígeno oxiránico

La determinación del oxígeno oxiránico se lleva a cabo con el fin de evaluar la presencia de grupos de oxígeno oxiránico en los ácidos grasos, los cuales resultan de su sustitución por los dobles enlaces mediante el proceso de epoxidación del aceite.

Este análisis se basa en la norma ASTM D1652 y el procedimiento se detalla a continuación:

En primer lugar, pesar 0,5 g de aceite epoxidado y disponerlos en un matraz Erlenmeyer. Añadir 12,5 ml de clorobenceno y cloroformo con la finalidad de disolver el aceite con ayuda de un agitador magnético. Una vez el aceite queda disuelto se añaden de 2 a 3 gotas de solución indicador cristal violeta.

El ácido bromhídrico (HBr) 0,1N se introduce en una bureta y el matraz con la disolución se coloca justo debajo sobre un agitador magnético. Podemos observar el montaje experimental en la Figura 19.

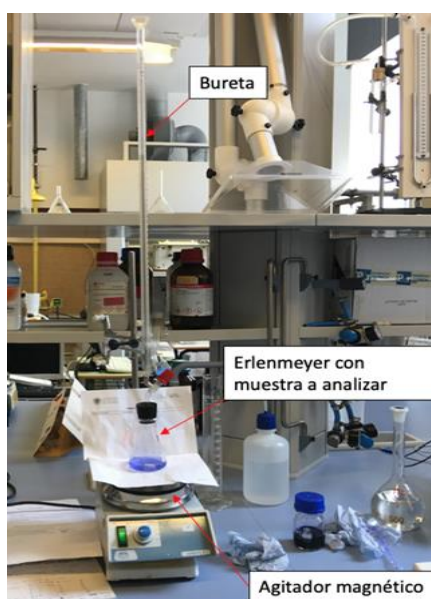


Figura 19. Montaje experimental de la valoración de oxígeno oxiránico

4.Desarrollo del proyecto

A continuación, se va introduciendo el ácido bromhídrico (HBr) en la disolución de aceite del Erlenmeyer de manera gradual observando como el color de la disolución pasa de violeta a verde. La evolución del viraje de color de la disolución se muestra en la Figura 20.

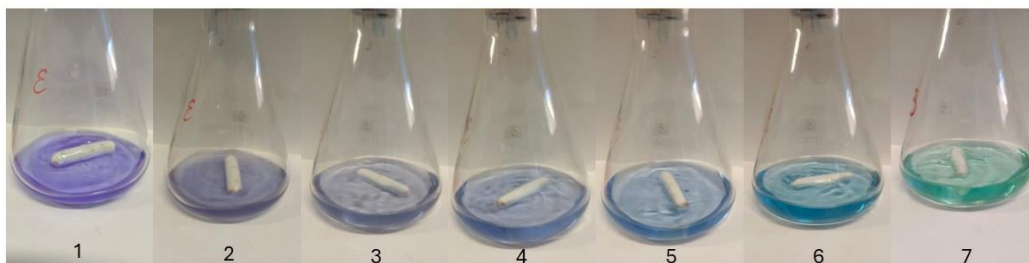


Figura 20. Variación de tonalidad del aceite durante la valoración del oxígeno oxiránico

Para determinar el oxígeno oxiránico se hace uso de la ecuación (1):

$$O_o = 1,6 \cdot N \cdot \frac{V \cdot B}{m} \quad (1)$$

donde,

O_o es el valor del oxígeno oxiránico, en porcentaje en masa.

N es la concentración equivalente de HBr a ácido acético glacial.

V es el volumen de la disolución volumétrica estándar de ácido bromhídrico (HBr) utilizada, en mililitros.

B es el volumen de la disolución volumétrica estándar de hidróxido potásico (KOH) utilizada para la valoración del blanco, en mililitros.

m es la masa de la porción de aceite empleado en el ensayo, en gramos.

4.2.2.2 Determinación del índice de yodo (IV)

La determinación del índice de yodo se realiza al aceite maleinizado y al aceite virgen de cáñamo para comparar los índices y poder saber cuantos dobles enlaces disponibles tiene el aceite que se va a utilizar.

Para realizar esta determinación se ha seguido la norma UNE-EN ISO 3961. Estando el procedimiento que se ha llevado a cabo descrito a continuación:

4.Desarrollo del proyecto

Pesar una cantidad de una masa especificada en la norma según el índice de yodo esperado para el aceite. En el caso del aceite de cáñamo pesar unos 0,8 g en un matraz Erlenmeyer. Posteriormente añadir 10 ml de ciclohexano, 10 ml de ácido acético glacial y 25 ml de reactivo Wijs. Una vez añadidos sellar el matraz agitar y guardar en la oscuridad durante 1 hora (dependiendo del índice esperado según la norma el tiempo varía). Tras el tiempo de espera se añaden a la mezcla 20 ml de yoduro potásico y 150 ml de agua. Finalmente, introduciendo el tiosulfato sódico en una bureta, siguiendo un montaje similar al del oxígeno oxiránico, se añade de manera gradual en la disolución hasta adquirir un color amarillo claro, donde se añadirán 2 o 3 gotas de almidón al matraz y pasará la disolución de amarillo claro a negro. Seguir valorando hasta que la disolución pase a un color blanco. En la Figura 21 podemos observar el cambio de color durante la valoración.



Figura 21. Variación de tonalidad del aceite durante la valoración del índice de yodo

En cuanto a la determinación matemática del índice de yodo se determina según la ecuación (2):

$$IV = \frac{12,69 \cdot c \cdot (V_1 - V_2)}{m} \quad (2)$$

Donde,

IV es la masa de yodo por cada 100 g de aceite (I_2 g/100 g de aceite).

c es la normalidad de la disolución de tiosulfato sódico (0,1 N).

V₁ es el volumen de tiosulfato sódico necesario para la valoración del blanco (mL).

4.Desarrollo del proyecto

V_2 es el volumen de tiosulfato sódico necesario para la valoración de la muestra (mL).

m es la cantidad de muestra usada (g).

4.2.3 Proceso de entrecruzamiento y curado de las probetas

Para poder obtener los termoestables y medir sus características mecánicas se debe preparar una formulación *Epoxy Equivalent Weight* (EEW): *Anhidride Equivalent Weight* (AEW) de 1:1 ya que esta relación es la que mejor comportamiento de equilibrio muestra para obtener el máximo grado de reticulación [25].

En este trabajo se deben realizar varias formulaciones manteniendo constantes las proporciones de EHO (50,6% de la masa total), con dos agentes reticulantes, uno de origen petroquímico, (MNA), con un 35% de la masa total y el otro de origen renovable (MHO) con un 11,6% de la masa total, 0,8% de glicerol y 2% 1-metilimidazol como acelerador, variando la cantidad de carga lignocelulósica como se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4. Composiciones de cáscara de cáñamo para la fabricación termoestable

Mezcla	FHO (%)	Contenido bio (%)
EHO/75MNA/25MHO	0	62,29
EHO/75MNA/25MHO/5FHO	5	64,27
EHO/75MNA/25MHO/10FHO	10	66,06
EHO/75MNA/25MHO/15FHO	15	67,68
EHO/75MNA/25MHO/20FHO	20	69,15

Todas las cantidades se pesaron en un recipiente de aluminio y se mezclaron de manera manual antes de verterlas en los moldes de silicona con unas celdas rectangulares estandarizadas para obtener probetas de dimensiones 80 x 10 x 4 mm³, de acuerdo con las especificaciones de la norma ISO 178.

Para el curado de las muestras se utilizó un ciclo de 3 horas en estufa a 120 °C seguido de un postcurado a 140 °C durante una hora y el resultado de

4.Desarrollo del proyecto

estas se puede ver en la Figura 22 siendo la de la izquierda la probeta sin carga y a su izquierda de 5, 10, 15 y 20 % respectivamente.



Figura 22. Probetas con diferentes concentraciones de carga tras el curado

Tras el proceso de mezclado y entrecruzado de las formulaciones se realiza un análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para evaluar el grado de curado (reticulación) y el comportamiento térmico final del termoestable.

4.2.3.1 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una técnica analítica que permite estudiar el comportamiento de un material al someterlo a un programa térmico, registrando la energía necesaria para mantener la muestra y una referencia a la misma temperatura durante el ensayo.

El equipo mide el flujo de calor asociado a las transiciones térmicas del material, proporcionando información sobre eventos como fusiones, cristalizaciones, transiciones vítreas y degradación. La curva obtenida representa la cantidad de energía absorbida o liberada por la muestra en función de la temperatura o el tiempo. A continuación, en la Figura 23 se muestra una imagen del equipo.



Figura 23. Equipo DSC Mettler-Toledo 821

El análisis DSC se realizó mediante una célula de medición Mettler-Toledo 821 suministrado por Mettler-Toledo Inc. (Schwerzenbach, Suiza), integrada en el conjunto de técnicas de análisis térmico de la serie STAR e2000. Se empleó una cantidad de muestra que variaba entre 5 y 10 mg. Se utilizaron crisoles estándar de aluminio con un volumen neto de 40 mL, tapa de aluminio y capacidad de sellado para prevenir posibles pérdidas de muestra. El gas de purga utilizado fue nitrógeno, con un flujo de $66 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. La calibración periódica de la célula DSC se llevó a cabo utilizando patrones de Indio y Zinc, con puntos de fusión y entalpías conocidos. La muestra se sometió a un ciclo térmico dinámico que abarcaba desde $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$, con una velocidad de calentamiento de $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

4.2.4 Técnicas de caracterización del termoestable

En este apartado se describen las técnicas de caracterización empleadas para conocer las propiedades mecánicas del termoestable obtenido.

4.2.4.1 Ensayo Charpy: Prueba de impacto

En el ensayo Charpy se busca determinar el grado de tenacidad del polímero, así como el grado de fragilidad a la fractura que presenta mediante la medición de la energía absorbida durante el impacto.

Este ensayo consiste en dejar caer un péndulo desde un ángulo determinado que golpee una probeta sin entalla ubicada en unos soportes en la base de la máquina.

4.Desarrollo del proyecto

Se lleva a cabo la medición de la absorción de energía de impacto de las muestras sin entalla siguiendo las pautas de la norma ISO 179, utilizando para ello un equipo Metrotec S.A. (San Sebastián, España) con un péndulo Charpy de 6 J. Se analizan un mínimo de 5 probetas con dimensiones de 80 x 10 x 4 mm³. En la Figura 24 se puede observar el equipo en el cual se han realizado los ensayos de impacto Charpy. Las unidades del ensayo se expresan en kJ/m², o J/cm².



Figura 24. Péndulo Charpy

4.2.4.2 Ensayo de dureza

La dureza mide la resistencia de un material a ser penetrado por un cuerpo más duro. El proceso consiste en aplicar un penetrador específico al material de ensayo y posteriormente medir la profundidad de la penetración. Existen dos escalas según si el material es más flexible o más rígido siendo la Shore A y Shore D respectivamente. Los valores que se obtienen van del 0 al 100, cuanto mayor es el número, mayor dureza tiene el material.

Este ensayo se ha efectuado en un durómetro 676-D J. Bot. S.A., (Barcelona, España). Se han realizado un mínimo de 5 mediciones por muestra obteniendo como resultado final el promedio de estas. El ensayo se desarrolla según la norma ISO 868 y el equipo se puede observar en la Figura 25.



Figura 25. Durómetro Shore D

4.2.4.3 Determinación de la absorción de agua

En el ensayo de absorción de agua se busca determinar la afinidad del material con la humedad, así como su comportamiento frente a la exposición a ambientes húmedos o a la inmersión en agua, lo cual puede afectar sus propiedades dimensionales, mecánicas y de durabilidad a largo plazo.

Este ensayo consiste en sumergir las probetas en agua destilada a temperatura ambiente durante periodos de tiempo establecidos, y sacar muestra para pesarla cada cierto tiempo. En este caso, durante las 6 primeras horas cada 2 horas y posteriormente cada 24 horas hasta masa constante y medir el incremento de masa como resultado de la absorción de agua por parte del material.

Para realizar las pesadas del ensayo se utiliza una balanza analítica modelo Nahita Blue serie 5134 EX.

Se lleva a cabo la medición siguiendo las pautas de la norma UNE-EN ISO 62:2008. Las probetas se secan previamente hasta masa constante, en una estufa de desecación y posterior desecador. Se pesan y luego se sumergen en agua a 23 °C. Transcurrido el tiempo de exposición, se retiran, se secan superficialmente y se vuelven a pesar. La diferencia de masa permite calcular el porcentaje de agua absorbida respecto a la masa inicial. Las unidades del

4.Desarrollo del proyecto

ensayo se expresan en % en masa o mg de agua por gramo de material. En la Figura 26 se puede observar como se etiquetan debidamente las probetas y se dejan sumergidas en agua destilada.



Figura 26. Ensayo de absorción de agua

5 Resultados

En este apartado se pretende analizar los resultados obtenidos tanto para la caracterización térmica del proceso de curado de las resinas como para la caracterización mecánica del termoestable.

Además de examinar los resultados, estos se compararán con resinas termoestables 100% de origen fósil para comprobar las diferencias existentes entre ambas resinas.

Por último se estudiará la cinética del reactor de epoxidación para poder sacar la constante y realizar un dimensionado posterior del reactor.

5.1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

En el presente apartado se emplea esta técnica para visualizar el ciclo de curado de los termoestables con diferentes concentraciones de carga lignocelulósica (0%, 5%, 10%, 15% y 20%). La Figura 27 presenta las curvas DSC correspondientes a los ciclos de curado de las resinas donde se identifican los picos exotérmicos característicos de la reacción de entrecruzamiento.

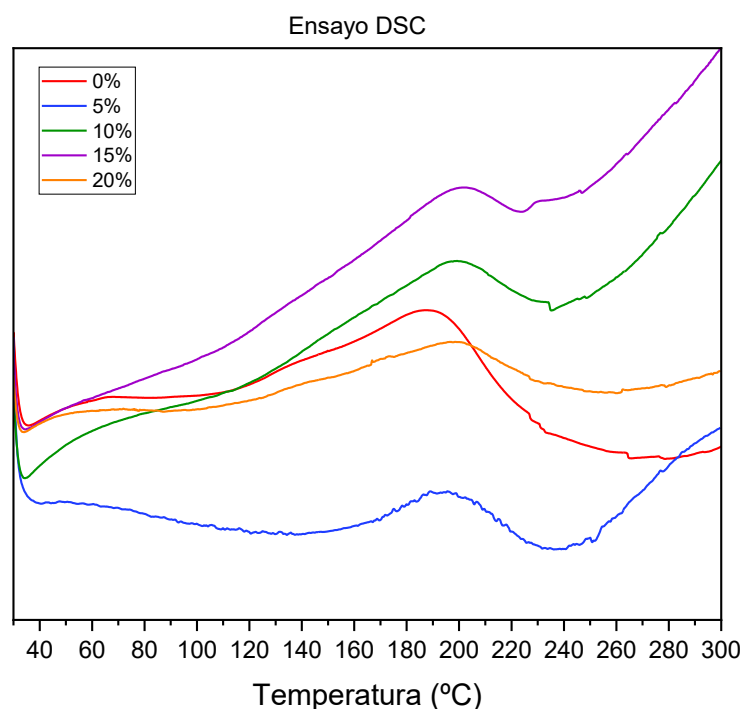


Figura 27. Comparación de los termogramas dinámicos de DSC del proceso de curado de diferentes muestras compuestas de aceite de cáñamos epoxidado (ACE), aceite de cáñamo maleinizado (ACM) y contenidos variables de cáscara de cáñamo

Tal y como puede apreciarse, todas las muestras poseen un pico exotérmico situado entre los 140 °C y los 240 °C aproximadamente. Esto indica que independientemente del contenido de carga empleada, los materiales compuestos desarrollados entrecruzan correctamente, obteniendo un material sólido, tal y como se observa en la Figura 27. La influencia de la carga en el termograma de DSC se aprecia en las muestras del 15 y 20%, que como consecuencia de la gran cantidad de carga, no exotérmica, las señales del DSC se atenúan.

En líneas generales, tomando como referencia la muestra sin la adición de carga de cáñamo, la temperatura del pico exotérmico se obtiene en torno a los 180°C. Esta temperatura indica la máxima velocidad de entrecruzamiento de las moléculas, es decir, la máxima velocidad de solidificación de la resina en el paso de líquido a sólido. La temperatura de los picos de máxima velocidad de entrecruzamiento se desplaza ligeramente hacia temperaturas más elevadas a medida que se aumenta el contenido de carga. Esto es debido a que la carga actúa durante el proceso de entrecruzamiento como atenuante de la reacción, absorbiendo parte del calor residual exotérmico y por tanto, necesitando de un mayor aumento de la temperatura.

5.2 Caracterización mecánica del termoestable

La caracterización mecánica de las muestras de los termoeestables nos permitirá conocer la influencia de la concentración de cáscara de cáñamo a las propiedades mecánicas del material.

5.2.1 Ensayo Charpy: Prueba de impacto

En la Tabla 5 se resumen los datos obtenidos de manera experimental en la prueba de impacto Charpy. Indicando la media de cada muestra con su respectiva desviación y error.

5.Resultados

Tabla 5. Datos experimentales, desviación y error del ensayo Charpy

Muestras	Resistencia al impacto (kJ/m ²)	Desviación (kJ/m ²)	Error (%)
EHO/75MNA/25MHO	7,69	2,90	37,71
EHO/75MNA/25MHO/5FHO	7,44	0,47	6,32
EHO/75MNA/25MHO/10FHO	11,5	3,57	31,04
EHO/75MNA/25MHO/15FHO	1,55	0,45	29,03
EHO/75MNA/25MHO/20FHO	3,00	0,71	23,67

En la Figura 28 se muestra la representación gráfica de los datos obtenidos en la Tabla 5 de manera experimental.

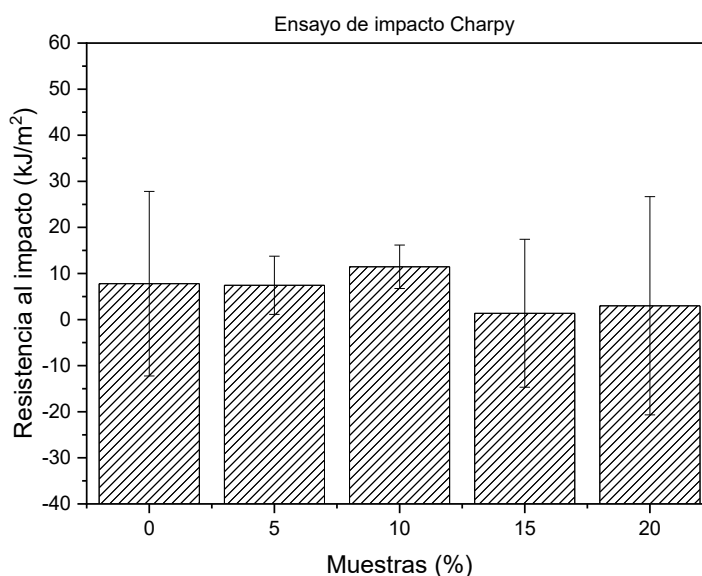


Figura 28. Resultados del ensayo de resistencia al impacto Charpy para los termoestables con diferentes porcentajes de carga

Como podemos observar, la resistencia al impacto varía en función de la carga que tenga el termoestable. Se aprecia un aumento en la resistencia al impacto a medida que aumentamos la concentración de carga lignocelulósica en el termoestable hasta alcanzar un 10%, donde alcanza la cantidad de energía máxima absorbida por el material. No obstante, cuando se aumenta esa concentración de carga, la resistencia al impacto decae de manera considerable. Esto puede deberse a posibles grietas o heterogeneidad en la muestra que actúan como puntos débiles frente a esfuerzos aplicados sobre ellos.

5.Resultados

5.2.2 Ensayo de dureza

En la Tabla 6 se especifican los valores obtenidos experimentalmente tras realizar el ensayo de dureza Shore D. Se realizaron 10 ensayos de los cuales se muestra la media de cada termoestable con diferente concentración de carga con su respectiva desviación y error.

Tabla 6. Datos experimentales, desviación y error del ensayo de dureza.

Muestras	Dureza Shore D	Desviación	Error (%)
0%	63	4	7
5%	60	5	9
10%	64	6	9
15%	50	5	10
20%	47	5	11

La dureza máxima se alcanza en la muestra con un 10% de carga, con un valor de 64 Shore D, mientras que la mínima se obtiene en la muestra con un 20% de carga, con un valor de 47 Shore D.

La introducción de un 5% y 10% de carga mantiene valores de dureza relativamente elevados y similares a la muestra sin carga, sin embargo, al superar el 10%, la dureza empieza a disminuir. La muestra al 15% presenta 50 Shore D, y la del 20%, 47 Shore D, lo que indica una pérdida progresiva de rigidez superficial del material.

Este comportamiento puede deberse a la dispersión de la carga en la matriz polimérica, que a partir de cierto umbral comienza a interferir en la integridad estructural del material, reduciendo su resistencia a la indentación.

En la Figura 29 se muestra de manera más gráfica los resultados obtenidos en el ensayo de dureza.

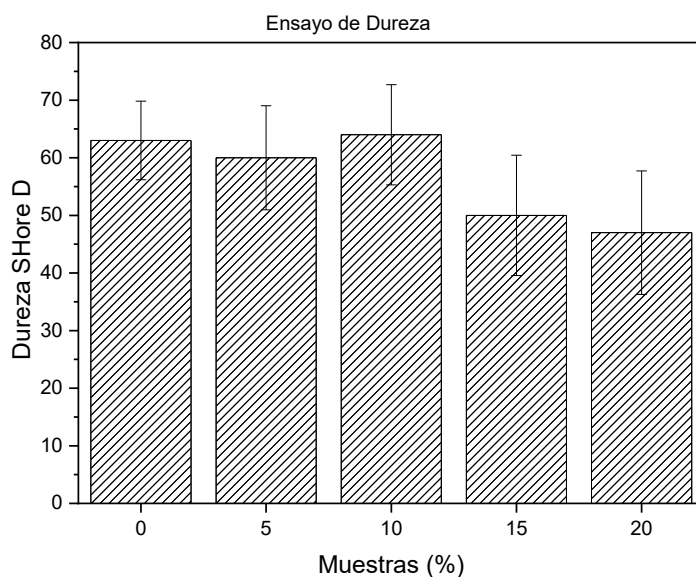


Figura 29. Representación de los datos experimentales de dureza Shore D.

5.2.3 Ensayo de absorción de agua

A continuación, en la Figura 30 podemos observar la evolución de agua absorbida en función del tiempo, donde se muestran los resultados obtenidos del ensayo tras diez días de mediciones (240 horas). Se realizan dos muestras de cada probeta con distinta proporción de cáscara de cáñamo. Siendo M1 0 la muestra 1 de la probeta sin carga, M2 0 la muestra 2 de la probeta sin carga, M1 5 la probeta 1 de la muestra al 5% de carga, y así sucesivamente.

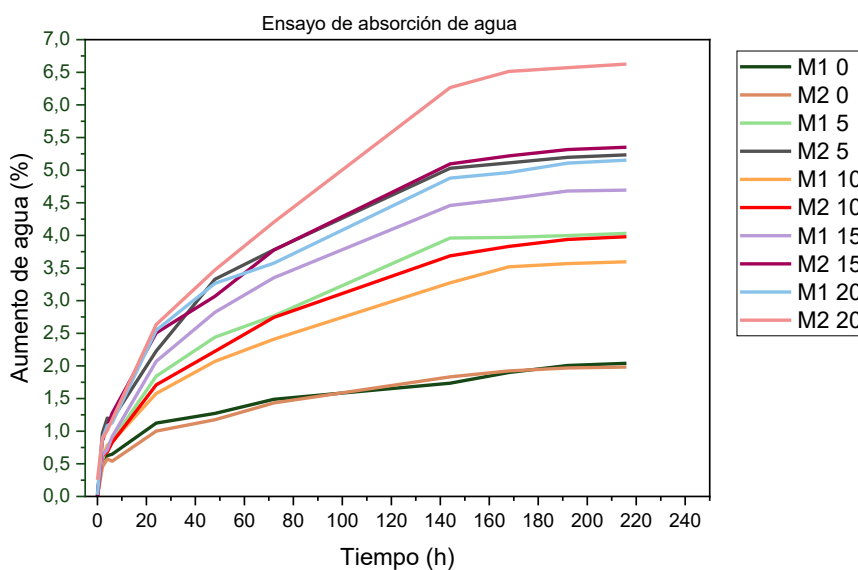


Figura 30. Ensayo de absorción de agua

Se observa que todas las muestras absorben agua rápidamente durante las primeras 24/48 horas. Sin embargo, se observa una tendencia ascendente en la absorción de agua a medida que se incrementa la concentración de carga en la matriz.

Las muestras sin carga (0%) presentan la menor absorción de agua, absorbiendo al final del ensayo un total de 3,5% de agua. A medida que se incrementa la carga al 5 y 10%, la absorción también aumenta, superando el 5% en algunos casos. Las formulaciones con 15 y especialmente con 20% de cáscara muestran los valores más elevados, llegando a un aumento de agua absorbida de hasta aproximadamente 6,5% al final del ensayo.

Con estos resultados podemos predecir que la presencia de relleno lignocelulósico favorece la absorción de agua en el termoestable, posiblemente debido a una mayor porosidad o a la afinidad de la carga por la humedad.

5.3 Comparativa con resinas termoestables comerciales

Tras la caracterización de los termoestables con variaciones en la concentración de carga se procederá a comparar los resultados obtenidos del termoestable bio con un termoestable 100% de origen petroquímico para evaluar las diferencias entre ellos. Para ello, utilizaremos la Figura 31 donde se puede apreciar de manera clara y visual las diferencias en todos los ensayos previamente realizados.

5.Resultados

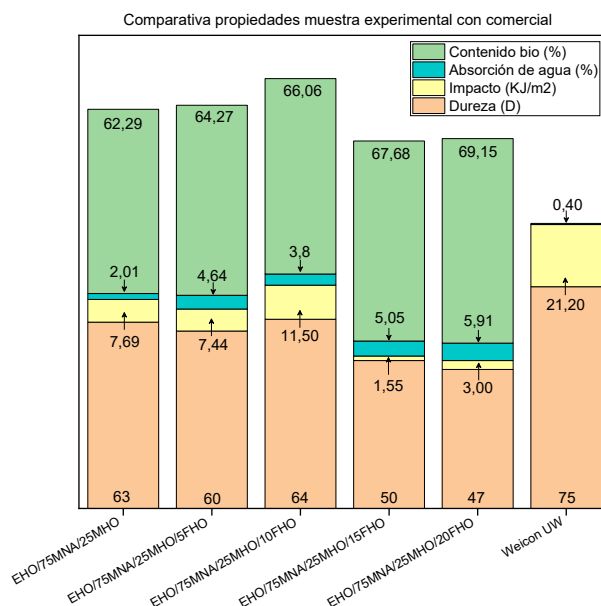


Figura 31. Comparación de las propiedades físicas de las muestras experimentales de cáñamo con resina comercial Weicon UW

En la parte inferior de la columna tenemos la dureza Shore D, como podemos observar, el compuesto petroquímico tiene una dureza superior a los de composición bio. Esta propiedad se incrementa a medida que aumenta el porcentaje de contenido bio, es decir de cáscara, hasta alcanzar su valor óptimo de 10% donde empieza a disminuir.

Posteriormente a la dureza tenemos la resistencia al impacto, esta actúa de la misma forma que la dureza en las muestras ya que el compuesto petroquímico tiene una resistencia al impacto superior a los de composición bio. No obstante, en los biopolímeros a medida que aumenta el porcentaje de contenido bio va mejorando la resistencia al impacto hasta superar el 10% de carga que empiezan a disminuir sus propiedades.

En cuanto a la absorción de humedad, Siendo un material 100% petroquímico, es de esperar que no presente absorción de agua o que esta sea mínima, debido a su naturaleza hidrofóbica. Sin embargo, a medida que aumenta el porcentaje de cáscara de cáñamo en la formulación, se observa un incremento en la absorción de humedad como consecuencia de la mayor interacción de la carga lignocelulósica con el agua, debido a su carácter más hidrofílico.

Aunque, como era previsible, las resinas experimentales parcialmente biobasadas presentan unas propiedades mecánicas algo inferiores en

comparación con la resina comercial 100% petroquímica, es importante destacar que el comportamiento de las formulaciones intermedias, especialmente la correspondiente a la muestra con un 10% de cáscara de cáñamo, ha mostrado resultados muy prometedores. Esta formulación ha conseguido mantener un buen equilibrio entre rigidez, dureza y resistencia al impacto, mostrando además una mejora significativa respecto a la muestra sin carga, gracias a la acción de refuerzo aportada por la fase lignocelulósica.

En términos de absorción de agua, aunque presenta un valor superior al de la muestra fósil, este incremento se mantiene dentro de unos márgenes aceptables para la aplicación prevista, sin comprometer la estabilidad dimensional ni la integridad estructural del material.

Desde el punto de vista medioambiental, la probeta del 10% es interesante al incorporar un mayor porcentaje de contenido renovable, reduciendo así la dependencia de recursos fósiles y favoreciendo la valorización de residuos agroindustriales como es la cáscara de cáñamo.

Teniendo en cuenta todos los ensayos experimentales realizados, que incluyen análisis térmico por DSC, resistencia al impacto Charpy, dureza Shore D y absorción de humedad, así como la comparativa global frente a la resina comercial de referencia, se concluye que la muestra con un 10% de carga de cáscara de cáñamo es la que ofrece el mejor compromiso entre sostenibilidad y prestaciones técnicas. Por todo ello, esta formulación ha sido seleccionada como la propuesta final del proyecto, al considerarse la más adecuada para su futura aplicación industrial.

5.4 Cinética del reactor de epoxidación

La cinética de la reacción de epoxidación del aceite de cáñamo se ha evaluado mediante el seguimiento de la evolución del contenido de oxígeno oxiránico a lo largo del tiempo de reacción. Como se ha descrito previamente en el apartado experimental, se tomaron muestras a intervalos de una hora durante las ocho horas de proceso, determinando en cada una de ellas el porcentaje de oxígeno oxiránico presente.

5.Resultados

La expresión para la velocidad de reacción, utilizada en la ecuación (3), se basa en el modelo propuesto por Leveneur, Sébastien en [26]:

$$r = k_1 \cdot [H_3O^+] \cdot ([aceite] \cdot [H_2O_2] - \frac{1}{k_2} \cdot [epox]) \quad (3)$$

Siendo:

r: La velocidad de reacción (mol/L·h)

k1: Constante cinética 1 (L² /mol²·h)

k2: Constante cinética 2 (L/mol)

[H₃O⁺]: Concentración de protones (mol/L)

[aceite]: Concentración de aceite virgen (mol/L)

[H₂O₂]: Concentración de peróxido de hidrógeno (mol/L)

[epox]: Concentración de aceite epoxidado (mol/L)

A lo largo de la reacción la concentración de aceite virgen y de peróxido se van a ir reduciendo mientras que la de aceite epoxidado se va a incrementar. En este apartado se pretende saber de qué forma cambian estas concentraciones, y para ello se van a poner todas en función del único parámetro medido a lo largo de la reacción, el oxígeno oxiránico.

En el caso de la concentración de aceite nos referimos a la concentración de dobles enlaces presentes en el aceite. En la ecuación (4) se expresa la concentración de dobles enlaces en función del oxígeno oxiránico quedando como:

$$[aceite] = [DE] = Oo_i + ([DE]_i - Oo) \quad (4)$$

Siendo:

[DE]: Concentración de dobles enlaces (mol/L)

Oo_i: Oxígeno oxiránico inicial (mol/L)

[DE]_i: Concentración de dobles enlaces iniciales (mol/L)

O_o: Oxígeno oxiránico a lo largo del tiempo de reacción (mol/L)

Para el peróxido de hidrógeno se realiza también una ecuación para que esté en función del oxígeno oxiránico quedando descrita en la ecuación (5):

$$[H_2O_2] = [H_2O_2]_i - (O_o - O_{o_i}) \quad (5)$$

Siendo:

[H₂O₂]: Concentración de peróxido de hidrógeno (mol/L)

[H₂O₂]_i: Concentración de peróxido de hidrógeno inicial (mol/L)

O_{o_i} : Oxígeno oxiránico inicial (mol/L)

O_o: Oxígeno oxiránico a lo largo del (mol/L) tiempo de reacción

Por último, la concentración de oxígeno oxiránico viene dada por la medición durante el ensayo.

Sustituyendo todas las variables en función del oxígeno oxiránico la ecuación cinética queda como (6):

$$r = k_1 \cdot [H_3O^+] \cdot ((O_{o_i} + ([DE]_i - O_o)) \cdot ([H_2O_2]_i - (O_o - O_{o_i})) - \frac{1}{k_2} \cdot [O_o]) \quad (6)$$

En la ecuación cinética tenemos valores constantes que se pueden calcular mediante mediciones que serán descritas a continuación.

La concentración de protones se mide mediante la medición del pH en el aceite cuyo valor se calcula antes de la reacción y después obteniendo un resultado idéntico, por lo tanto, se considera constante a lo largo de la reacción, siendo este valor de 4,55. Mediante la ecuación (7) se consigue la concentración de protones en el aceite.

$$[H_3O^+] = 10^{-pH} \quad (7)$$

5.Resultados

Sustituyendo la ecuación:

$$[H_3O^+] = 10^{-4,55} = 2,85 \cdot 10^{-5}$$

La concentración de oxígeno oxiránico inicial la obtenemos tras la primera medición antes de empezar la reacción de epoxidación, siendo esta, de 0,21 mol/L.

En cuanto a la concentración de dobles enlaces iniciales en el aceite se obtiene mediante la medición del índice de yodo en el aceite virgen. Siendo esta de 140 g I₂/100 g de aceite.

Sabiendo la masa molecular del I₂ podemos saber a cantidad de dobles enlaces presentes en el aceite. La ecuación (8) muestra como se calcula.

$$[DE] = \frac{i_{I_2}}{\frac{Mm_{I_2}}{100}} \cdot m_a \cdot \rho_a \quad (8)$$

Donde:

[DE]: Moles de dobles enlaces en el aceite (mol)

i_{I2}: Índice de yodo del aceite (g_{I2}/100 g de aceite)

Mm_{I2}: Masa molecular I₂ (g/mol)

m_a: Masa del aceite (kg)

ρ_a: Densidad del aceite (g/L)

Sustituyendo la ecuación obtenemos:

$$[DE] = \frac{140}{\frac{253}{100}} \cdot 100 \cdot 943,52 = 5,22 \text{ mol/L}$$

Finalmente, para saber la concentración inicial de peróxido de hidrógeno sabemos que este se introduce en un ratio de 2 respecto a la concentración de dobles enlaces iniciales, por lo tanto, la concentración de peróxido de hidrógeno es de 10,44 mol/L.

5.Resultados

Con los valores de las constantes cinéticas obtenidas, reflejando la evolución del oxígeno oxiránico a lo largo de la reacción, se realiza una simulación para realizar un ajuste no lineal de parámetros en Matlab R2022b y así obtener los valores de las constantes cinéticas. Esta simulación se ve reflejada en la Figura 32.

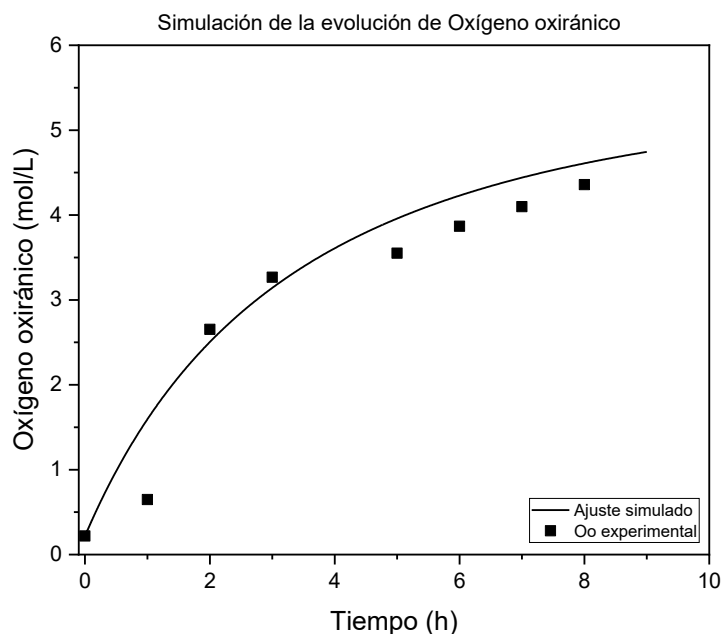


Figura 32. Simulación de oxígeno oxiránico durante la reacción de epoxidación

En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos tras el ajuste de los parámetros del modelo a los datos experimentales de la evolución del contenido de oxígeno oxiránico durante la epoxidación del aceite de cáñamo, utilizando el método de mínimos cuadrados no lineales.

Tabla 7. Parámetros cinéticos obtenidos del ajuste no lineal de la reacción de epoxidación del aceite de cáñamo

Constantes cinéticas	Valor (h^{-1})	LCI (95%) (h^{-1})	LCS (95%) (h^{-1})
k1	1111,47	1103,63	1119,32
k2	18,03	17,92	18,15

El modelo cinético utilizado se basa en una cinética de primer orden, ajustando dos parámetros principales:

5.Resultados

k_1 representa el valor de la constante de velocidad de la reacción siendo el valor ajustado de $1111,47 \text{ L}^2/\text{mol}^2\cdot\text{h}$, con un intervalo de confianza al 95% entre $1103,63$ y $1119,32 \text{ L}^2/\text{mol}^2\cdot\text{h}$.

k_2 corresponde a la segunda constante de velocidad de la reacción siendo su valor de ajuste de $18,03 \text{ L/mol}$ con un intervalo de confianza al 95% entre $17,91$ y $18,15 \text{ L/mol}$.

El valor de la diferencia por mínimos cuadrados entre los valores experimentales y los valores teóricos obtenidos es de 0.9974 . Este valor relativamente bajo sugiere que el modelo empleado reproduce adecuadamente el comportamiento cinético observado durante la reacción. En conjunto, los resultados obtenidos permiten validar el modelo cinético propuesto para describir la evolución del oxígeno oxiránico en la epoxidación del aceite de cáñamo bajo las condiciones experimentales empleadas.

Posteriormente, se calculará el volumen del reactor de acuerdo con su cinética y el tiempo de residencia óptimo.

6 Estudio económico

6.1 Diseño de las instalaciones a escala industrial

En este apartado se pretende diseñar cada uno de los equipos utilizados durante el proceso, resaltando tres diferentes etapas; La primera de ellas, la extracción de aceite de cáñamo, seguidamente, la modificación química del aceite de cáñamo tanto de la epoxidación como de la maleinización. Finalmente, el procesado de baldosas a partir de resina epoxi, con endurecedor y cargas de cáscara de cáñamo. En concreto, para este supuesto económico, se pretende establecer un proceso productivo capaz de fabricar aproximadamente 40 baldosas al día.

Como se puede observar a lo largo del trabajo, se realizan diversas muestras con distintas proporciones de cáscara de cáñamo que posteriormente se caracterizan para poder observar cual de ellas es la más óptima para dicha función como baldosa. Basándose en los resultados experimentales obtenidos, para trabajar a nivel industrial se escogen las que tienen un 10% de carga ya que se obtienen las propiedades de dureza y resistencia al impacto más grandes, así como absorben poca agua en comparación con el resto de cargas. Por tanto, el diseño industrial propuesto para la producción de baldosas se ha basado en esta formulación con un 10% de carga de cáscara de cáñamo, al considerarse el punto óptimo según los resultados experimentales obtenidos.

Para poder saber la cantidad de reactivos necesarios y el posterior dimensionamiento de los equipos a utilizar durante el proceso, se pesa una probeta a escala de laboratorio de dimensiones 80 x 10 x 4 mm³ y obtenemos su densidad con la ecuación (9):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

Donde:

ρ: densidad (g/cm³)

m: masa (g)

6. Estudio económico

V: volumen (cm³)

Si reemplazamos en la ecuación se obtiene:

$$\rho = \frac{2,80}{3,18} = 0,88 \frac{g}{cm^3} = \frac{kg}{L}$$

Sabiendo que la densidad es de 0,88 kg/L y que las dimensiones de nuestra baldosa van a ser de 100 x 100 x 2 cm³, se puede obtener la masa necesaria de cada baldosa, ya que el valor de la densidad no cambiará, obteniendo el siguiente valor:

$$m = \rho \cdot V = 0,88 \frac{g}{cm^3} \cdot \frac{20.000 \text{ cm}^3}{1000} = 17,61 \text{ kg}$$

Al sumarle la carga que debe de ser de un 10% del valor de la resina, conocido en ingles como: per hundred resine (phr), la masa de una baldosa de dichas dimensiones cambia y pasa a ser de 19,57 kg.

Utilizando las mismas proporciones que en el laboratorio, para producir 40 baldosas de resina epoxi diarias se van a necesitar como mínimo la cantidad de reactivos descritos en la Tabla 8.

Tabla 8. Cantidades de los reactivos necesarios para la producción diaria y semanal de las baldosas

Reactivos necesarios	Proporciones	Cantidad diaria (kg/d)	Cantidad semanal (kg/semana)
EHO	0,51	356,74	1.783,68
MNA	0,35	246,51	1.232,53
MHO	0,12	82,41	412,03
Glicerol	0,01	5,35	26,76
Imidazol	0,02	13,56	67,78
Carga	0,10	78,28	391,42

Todos los reactivos que aparecen en la tabla se comprarán como materias primas excepto el EHO y el MHO que será producido en la segunda fase de nuestro proceso productivo.

6. Estudio económico

Sabiendo estos datos y que nuestra empresa trabajará 16 horas al día por un periodo de 5 días a la semana, se muestra la producción semanal para poder realizar un dimensionado de equipos mostrando sus especificaciones. Para ello, y como se menciona anteriormente, se diferencian tres grandes etapas en las que se divide el proceso productivo.

6.1.1 ETAPA 1: Extracción del aceite de cáñamo

Para poder observar de manera visual el proceso de obtención del aceite, así como la cáscara de cáñamo, en la Figura 33 se muestra el diagrama de flujo de esta primera etapa. Después de obtener las semillas de cáñamo estas son extruidas, posteriormente el aceite es centrifugado y almacenado y la cáscara obtenida por otra parte también se almacenará.

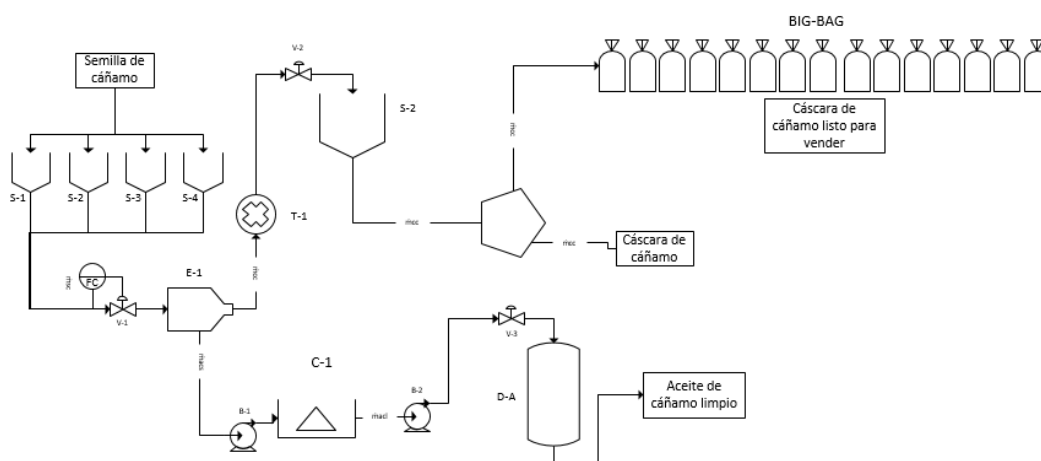


Figura 33. Diagrama de flujo de la etapa 1 del proceso de producción

En los siguientes apartados se van a estudiar los diseños de cada equipo necesario para llevar a cabo la extrusión del aceite.

6.1.1.1 Diseño de la centrífuga

Mediante la centrífuga se pretende eliminar las impurezas sólidas que quedan después del proceso de extrusión en emulsión con el aceite.

A pesar de ser un paso posterior a la extrusión se describe antes ya que en la centrífuga se elimina cierta masa proveniente del poso que queda tras el proceso de centrifugado que se debe tener en cuenta para obtener la cantidad de aceite limpio requerido. Ese rendimiento viene dado por las especificaciones indicadas del equipo elegido, una centrífuga separadora de acero inoxidable Westfalia SB 7-06-

6. Estudio económico

076 fabricada por Westfalia Separator AG (Barneveld, Holanda). Las especificaciones se describen en la Tabla 9.

Tabla 9. Características generales centrífuga utilizada en la etapa 1 [27]

<i>Especificaciones</i>	<i>Centrífuga Westfalia</i>
Capacidad de producción (L/min)	3
Rendimiento de separación (%)	98,6
Consumo (kW)	4
Dimensiones (m³)	1,2 x 1 x 1,2

Además, en la Figura 34 podemos observar una centrífuga industrial como la que utilizamos en nuestro proceso productivo.



Figura 34. Separadora centrífuga industrial [28]

Para saber el flujo másico de aceite que necesitamos debemos sumar la cantidad necesaria para realizar el proceso de epoxidación y de maleinización descritos en la Tabla 8, Siendo de 356,74 kg/d y de 82,41 kg/d respectivamente, alcanzando un total de 439,15 kg/d de aceite limpio. Sabiendo que la centrífuga elegida tiene un rendimiento del 98,6% con la ecuación (10) podemos obtener el aceite sucio necesario.

$$\dot{m}_{acs} = \dot{m}_{acl} \cdot \frac{100}{R} \quad (10)$$

Donde:

$\dot{m}_{acs}$: flujo másico de aceite de cáñamo sucio (kg/d)

$\dot{m}_{acl}$: flujo másico de aceite de cáñamo limpio (kg/d)

R: Rendimiento de las especificaciones de la centrífuga (%)

Aplicando la ecuación se obtiene:

$$\dot{m}_{acs} = 439,15 \cdot \frac{100}{98,6} = 445,39 \text{ kg/d}$$

6.1.1.2 Diseño de la extrusora

La extrusora en frío es una máquina que extrae aceite de semillas o frutos secos utilizando un proceso mecánico de presión sin aplicar calor.

Para realizar un escalado a nivel industrial se deben considerar varios aspectos como la capacidad de procesamiento diaria, la eficiencia del equipo, el consumo energético o el coste de esta.

Como hemos visto en el apartado anterior se necesitan 445,39 kg/día de aceite sucio.

Mediante la ecuación (11) se obtiene la semilla necesaria que se necesita extruir diariamente para obtener la cantidad de aceite deseado.

$$\dot{m}_{sc} = \dot{m}_{acs} \cdot \frac{100}{R} \quad (11)$$

Donde:

$\dot{m}_{sc}$: flujo másico de semilla de cáñamo (kg/d)

$\dot{m}_{acs}$: flujo másico de aceite de semilla de cáñamo (kg/d)

R: Rendimiento del proceso de extrusión (%)

Al aplicar la ecuación con nuestros datos obtenemos:

$$\dot{m}_{sc} = 445,39 \cdot \frac{100}{16,23} = 2744,21 \text{ kg/d}$$

Como se trabajará durante 8 horas en un día, el caudal que deberá tratar la extrusora deberá ser de 445,39 kg/día, siendo este de 55,67 kg/h.

6. Estudio económico

Para seleccionar la extrusora y teniendo en cuenta las especificaciones mencionadas anteriormente se seleccionó una extrusora 6Y-260, distribuida por Henan Double Elephants Machinery Co., Ltd. (Henan, China), específicamente se seleccionó ya que la capacidad de producción se ajusta a la requerida. En la Tabla 10 podemos ver las características generales de la extrusora junto con la Figura 35 en la cual se muestra una extrusora comercializada con las mismas características que se necesitan durante este proceso.

Tabla 10. Características generales extrusora utilizada en la etapa 1 [29]

Especificaciones	Modelo 6Y-260
Capacidad de producción (kg/h)	60
Potencia (kW)	2,2
Dimensiones (m³)	1 x 0,7 x 1,45
Peso (kg)	1.200



Figura 35. Máquina extrusora industrial de un solo tornillo [30]

6.1.1.3 Diseño silo del almacenamiento de semilla de cáñamo y de cáscara de cáñamo

La semilla de cáñamo se recibirá semanalmente y se almacenará en silos dispuestos encima de la extrusora para que caigan por gravedad en ella.

Sabiendo la producción diaria de aceite que se necesita, mencionada en el apartado anterior, se deben almacenar a la semana como mínimo 13.528,74 kg, es decir los 5 días laborales. Es por ello que se necesitarán 4 tolvas de 4.000 kg de capacidad cada una cuyo diseño se muestra en la Figura 36:



Figura 36. Silos de almacenamiento para la semilla de cáñamo [31]

Tras la extrusión se obtendrá una cantidad de cáscara de cáñamo de 11.333,3 kg calculada a partir de la ecuación (12):

$$\dot{m}_{cc} = (1 - R) \cdot \dot{m}_{scs} \quad (12)$$

Donde:

$\dot{m}_{cc}$: flujo másico de cáscara de cáñamo semanal (kg/semanal)

$\dot{m}_{scs}$: flujo másico de semilla de cáñamo semanal (kg/semana)

R: Rendimiento de la extracción de aceite (%)

Aplicando la ecuación se obtiene:

$$\dot{m}_{cc} = (1 - 0,1623) \cdot 13.528,74 = 11.333,3 \text{ kg}$$

Dicha masa generada de cáscara de cáñamo también será almacenada en tolvas de las mismas características que las utilizadas para la semilla de cáñamo.

De la masa total de cáscara de cáñamo generada, en el proceso productivo tan solo será utilizada un 0,1 % de esta, es decir 1.133,3 kg. Los 10.199,73 kg restantes, se trasladarán a bolsas tipo “big bag”, cuyo diseño podemos ver en la Figura 37 de capacidad de 1.000 kg para posteriormente ser vendidas en alimentación para ganadería.



Figura 37. Bolsa tipo “Big Bag” para almacenamiento de la carga en venta [32]

6.1.1.4 Diseño de molino triturador

Para poder añadir la carga al termoestable y que entrecruce de manera correcta, es necesario que esté en forma de polvo, además para un mejor transporte y menor volumen de almacenamiento de la carga también es recomendable triturarla antes. Por lo tanto, se utiliza un molino triturador de acero inoxidable modelo H-4199 marca Humboldt, distribuido por Raptor Suplies (Handelsweg, Países Bajos) que se muestra en la Figura 38 y cuyas características quedan descritas en la Tabla 11.



Figura 38. Molino triturador industrial

Tabla 11. Características generales trituradora utilizada en la etapa 1 [33]

Especificaciones	Modelo H-4199
Capacidad de producción (kg/h)	320
Potencia (kW)	0,5
Dimensiones (m ³)	1 x 0,7 x 1,45
Peso (kg)	113

6.1.1.5 Diseño del depósito de almacenamiento del aceite refinado

Tal y como se menciona en el apartado anterior, se realiza la extrusión y el centrifugado para obtener 439,14 kg/día de aceite refinado listo para pasar a la siguiente etapa. Mientras este no necesite ser utilizado, se almacenará en un tanque de acero inoxidable de 500 L ya que el aceite no va a almacenarse, si no que se va a ir consumiendo a medida que se extruya. Por lo tanto, el depósito de aceite refinado (D-A) tendrá un diámetro de 0,7 m, y una altura de 1,3 m. En la Figura 39 se muestra el tipo de depósito que utilizaremos para todas las materias primas líquidas.



Figura 39. Depósito de acero inoxidable para el almacenamiento de aceite [34]

6.1.1.6 Comparativa silos y depósitos de almacenamiento para la etapa 1

En la Tabla 12 se muestra una comparativa de las dimensiones de los silos de almacenamiento de sólidos para la etapa 1.

Tabla 12. Comparativa de los silos de almacenamiento para la etapa 1

Dimensiones	Silo semilla de cáñamo (S1)	Silo cáscara de cáñamo para producción (S2)	Bolsas tipo “Big Bag” para venta de cáscara de cáñamo
Masa admitida (kg)	4.000	4.000	1.000
Cantidad de silos	4	1	15

6.Estudio económico

En la Tabla 13 se muestra una recopilación de las dimensiones del único depósito utilizado en la etapa 1 para el aceite refinado.

Tabla 13. Depósito de almacenamiento para la etapa 1

Dimensiones	Depósito aceite refinado (D-A)
Altura (m)	1,3
Diámetro (m)	0,7
Volumen (L)	500

6.1.2 ETAPA 2: Modificación química del aceite de cáñamo

Una vez el aceite queda extruido y fuera de impurezas, este pasa a la segunda etapa del proceso donde se modifica químicamente.

En la Figura 40 se muestra un diagrama de flujo de las dos líneas de modificación de aceite tanto maleinizado como epoxidado. A pesar de que también se tendrá en cuenta el reactor de maleinización en el escalado industrial y el estudio económico, en este trabajo nos centraremos en el diseño del reactor de epoxidación, estudiando su cinética química para calcular el volumen necesario de este y dimensionarlo correctamente.

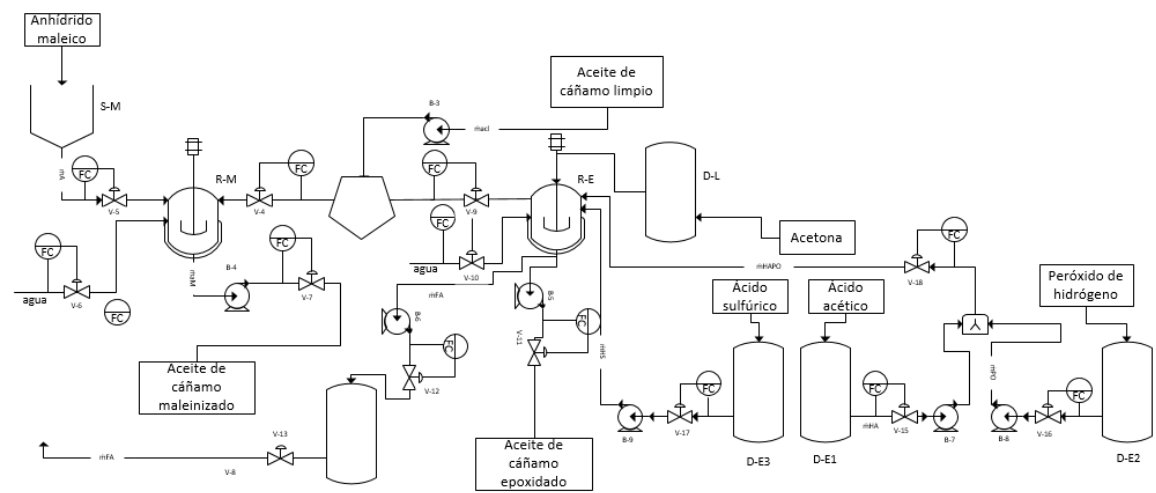


Figura 40. Diagrama de flujo de la etapa 2 del proceso productivo

6.1.2.1 Diseño de depósitos de almacenamiento de reactivos para la epoxidación

Para realizar la epoxidación es necesario tener depósitos de almacenamiento de los catalizadores y agentes formadores de la reacción. En este apartado se describirán cada uno de ellos y sus respectivas dimensiones.

6.1.2.1.1 Depósito de ácido acético

En el diseño del depósito de ácido acético se debe tener en cuenta la relación molar respecto al aceite de cáñamo, cuyo valor en este caso es de (0,5:1). Para poder conocer el volumen del depósito es necesario saber los valores de riqueza, peso molar y densidad del compuesto, así como los moles de dobles enlaces presentes en el aceite de cáñamo como podemos ver en la ecuación (13).

Se necesitan 178,37 kg de aceite virgen para a una epoxidación. Para determinar la cantidad de dobles enlaces presentes en nuestro aceite se realiza una determinación de índice de yodo siendo esta de 140 g I₂/100 g de aceite como se ha mencionado anteriormente. Sabiendo la masa molecular del I₂ podemos saber a cantidad de dobles enlaces presentes en el aceite. La ecuación (13) muestra como se calcula.

$$n_{DE} = \frac{\frac{i_{I_2}}{Mm_{I_2}}}{100} \cdot m_a \quad (13)$$

Donde:

n_{DE}: Moles de dobles enlaces en el aceite (mol)

i_{I₂}: Índice de yodo del aceite (g_{I₂}/100 g de aceite)

Mm_{I₂}: Masa molecular I₂ (g/mol)

m_a: Masa del aceite (kg)

Si se sustituye en la ecuación, obtenemos la cantidad de dobles enlaces en el aceite.

$$n_{DE} = \frac{\frac{140}{253}}{100} \cdot 178.370 = 987,03 \text{ moles}$$

6. Estudio económico

Una vez se saben todas las incógnitas se puede resolver la ecuación (14) para calcular el volumen del tanque de ácido.

$$V_{D-E1} = \frac{r \cdot n_{DE} \cdot Mm \cdot 100}{\rho \cdot \%R \cdot 1.000} \quad (14)$$

Donde:

V_{D-E1}: Volumen tanque de almacenamiento de CH₃COOH (L)

r: Ratio molar del ácido acético respecto al aceite de cáñamo

n_{DE}: Moles de dobles enlaces en el aceite (mol)

Mm: Masa molecular CH₃COOH (g/mol)

ρ: Densidad CH₃COOH (g/cm³)

%R: Riqueza CH₃COOH (%)

Aplicando dicha ecuación se obtiene el valor del volumen por ciclo de epoxidación.

$$V_{D-E1} = \frac{0,5 \cdot 987,03 \text{ mol} \cdot 60,05 \text{ g/mol} \cdot 100}{1,05 \text{ g/cm}^3 \cdot 99,7 \cdot 1000} = 28,31 \text{ L}$$

Como las materias primas se reciben semanalmente, si multiplicamos ese valor por 2 ciclos diarios 5 veces a la semana se obtiene un volumen de 283,1 L/ semana. En base al valor obtenido se decide escoge un depósito de 350 L de acero inoxidable con un diámetro de 0,6 m y una altura de 1,2 m.

6.1.2.1.2 Depósito de peróxido de hidrógeno

Para calcular el volumen de dicho tanque se debe proceder de la misma manera que con el ácido acético, pero en este caso la relación molar es de 2:1 y se deben utilizar las densidades, riquezas y masas moleculares del peróxido de hidrógeno.

$$V_{D-E2} = \frac{2 \cdot 987,03 \text{ mol} \cdot 34,01 \text{ g/mol} \cdot 100}{1,1 \text{ g/cm}^3 \cdot 30 \cdot 1000} = 203,45 \text{ L}$$

Como las materias primas se reciben semanalmente, si multiplicamos ese valor por 2 ciclos diarios 5 veces a la semana se obtiene un volumen de 2.034,5 L/

6. Estudio económico

semana. En base al valor obtenido se decide escoger un depósito de 2.500 L de acero inoxidable con un diámetro de 1,2 m y una altura de 2,35 m.

6.1.2.1.3 Depósito de ácido sulfúrico

En el caso del ácido sulfúrico se deben introducir un 2% de la masa conjunta de ácido acético y peróxido de hidrógeno, teniendo en cuenta que debemos conocer el volumen utilizamos la densidad junto con la riqueza para saber el volumen real como se muestra en la ecuación (15).

$$V_{D-E3} = \frac{\%wt \cdot (m_{CH_3COOH} + m_{H_2O_2}) \cdot 100}{\rho \cdot 1000 \cdot \%R} \quad (15)$$

Siendo:

V_{T-E3}: Volumen tanque de almacenamiento de H₂SO₄ (L)

%wt: concentración másica de H₂SO₄

m_{CH₃COOH}: Masa de ácido acético (g)

m_{H₂O₂}: Masa de peróxido de hidrógeno (g)

ρ: Densidad H₂SO₄ (g/cm³)

%R: Riqueza H₂SO₄ (%)

Aplicando dicha ecuación se obtiene el valor del volumen por ciclo de epoxidación.

$$V_{D-E3} = \frac{0,02 \cdot (29.635,51 + 67.137,62) \cdot 100}{1,84 \cdot 1.000 \cdot 96} = 1,1 \text{ L}$$

Como en este caso el volumen es muy pequeño, se recibirán las materias trimestralmente. Por lo tanto, multiplicamos el valor por 2 ciclos al día, 5 veces a la semana durante 12 semanas y sale un volumen de tanque mínimo de 132 L. Para evitar problemas de corrosión por el contacto con ácido sulfúrico, se seleccionó un tanque fabricado en acero inoxidable con aleación especial Alloy 20, conocida por su alta resistencia frente a medios ácidos y, en particular, frente al ácido sulfúrico de 150 L aproximadamente con un diámetro de 0,45 m y una altura de 0,9 m.

6.1.2.2 Diseño reactor de epoxidación

La reacción de epoxidación es uno de los procesos clave en nuestra producción de baldosas epoxi. Esta, depende de todas las materias prima de entrada, que, principalmente el cáñamo puede variar su procedencia y por tanto sus características principales como el índice de yodo, cuyo valor afectaría a la concentración de dobles enlaces presentes y por lo tanto afectaría a la reacción, debiendo de aumentar o disminuir el tiempo de reacción para obtener la misma conversión final de aceite epoxidado.

En este caso, se supone que la concentración inicial de índice de yodo es la misma que la de los ensayos experimentales realizados en el laboratorio a pequeña escala, y por lo tanto, como se observa en la Figura 41 el tiempo de residencia óptimo es de 7 horas más media hora para vertido de reactivos y media hora de limpieza del reactor posteriormente a la reacción. Se realizan 2 ciclos ya que diariamente se trabaja 16 horas. Se trabajará con un reactor discontinuo de tanque agitado (RDTA) encamisado.

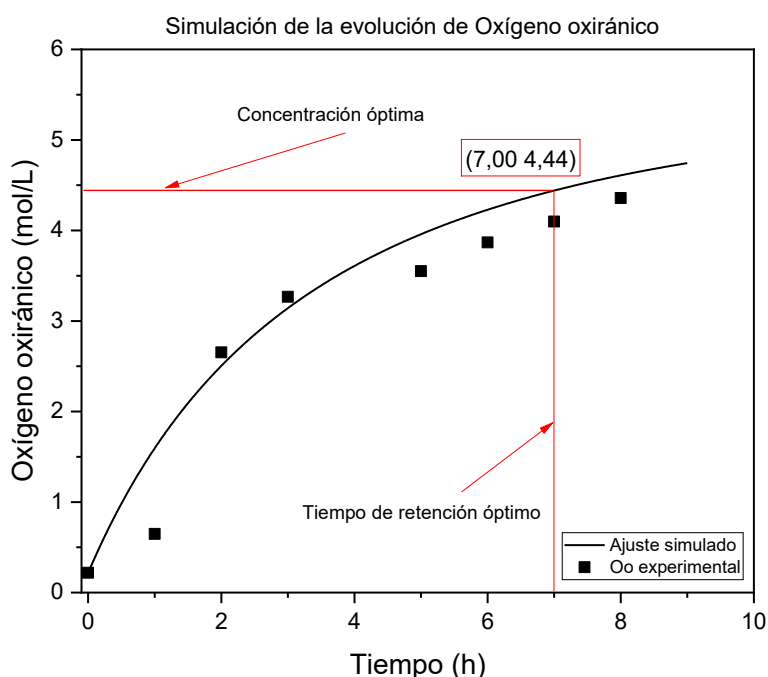


Figura 41. Tiempo de retención y concentración óptima para el proceso de epoxidación

Se necesita una producción de 178,37 kg de aceite por cada ciclo, esa producción en moles de dobles enlaces es de 987,03 mol/ciclo con una

6. Estudio económico

concentración inicial de 2,32 mol/L. Con la ecuación (16) se puede saber el volumen del reactor.

$$V_{RE} = \frac{\text{Producción} \left(\frac{\text{mol}}{\text{ciclo}} \right)}{\text{Concentración} \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right)} \quad (16)$$

Si sustituimos en la ecuación obtenemos:

$$V_{RE} = \frac{987,03 \frac{\text{mol}}{\text{ciclo}}}{2,32 \frac{\text{mol}}{\text{L}}} = 425,44 \text{ L}$$

Por lo tanto, se decide trabajar con un reactor de 500 L de acero inoxidable marca Laizhou Taihe Chemical Machinery Co., Ltd (Shandong, China) ya que a consecuencia de la agitación se genera un vórtice que incrementa el volumen durante la agitación cuyo diseño se puede observar en la Figura 42.



Figura 42. Reactor discontinuo de tanque agitado (RDTA) [35]

Por otro lado, en cuanto a características del reactor elegido, éste es un reactor encamisado. Por dicha camisa 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. Las características más relevantes para el reactor se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 14. Especificaciones del RDTA para la reacción de epoxidación [36]

Especificaciones reactor		Dimensiones generales	
P máx (atm)	6	Diámetro interno (m)	0,9
Tª máx (°C)	300	Diámetro equipo (m)	1,1
Potencia máx (kW)	18	Altura interna (m)	1,25
Velocidad agitación (rpm)	500	Altura total equipo (m)	2,5
Peso total (kg)	800	Volumen (L)	500

F

Para el correcto desarrollo del proceso de epoxidación a escala industrial, se ha implementado un sistema de control automático tanto en el reactor como en los silos de almacenamiento de reactivos.

La temperatura del reactor se controla de manera automática mediante un sistema de lazo cerrado, compuesto por un transmisor de temperatura (TT), un controlador de temperatura (TC) y una válvula de control neumática que regula la entrada de agua en la camisa del reactor. Este sistema permite mantener de forma precisa la temperatura de trabajo requerida entre 70 y 75 °C durante toda la reacción, evitando desviaciones térmicas que puedan afectar a la calidad del producto.

Por otro lado, la dosificación de los reactivos líquidos (ácido acético, peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico) se realiza de manera automática a partir de los silos de almacenamiento, mediante el uso de caudalímetros (FT) y válvulas de control que permiten verter exactamente el volumen necesario de cada reactivo al reactor. Esta dosificación controlada está supervisada por un PLC (Controlador Lógico Programable), que gestiona las señales de entrada y salida de los sensores y actuadores del sistema, asegurando así una alimentación precisa y segura.

Además, todo el proceso puede ser monitorizado y ajustado desde una pantalla HMI (Interfaz Hombre-Máquina), donde el operario puede visualizar en tiempo real las variables clave como temperatura, caudal y nivel de los tanques de reactivos.

6.1.2.2.1 Diseño decantador

Una vez finalizado el proceso de epoxidación en el reactor, la mezcla resultante contiene tanto la fase orgánica, correspondiente al aceite epoxidado, como una fase acuosa de los restos de los reactivos utilizados, principalmente ácido acético, ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno.

Para realizar la separación de estas dos fases, el contenido del reactor se transfiere de manera automática a un decantador, diseñado específicamente para este tipo de procesos. Esta transferencia se lleva a cabo mediante un sistema de bombeo controlado electrónicamente, que opera según las indicaciones del sistema de control de planta.

Dentro del decantador, la separación de las fases se produce por diferencia de densidades, permitiendo que la fase acuosa quede en la parte inferior y la fase del aceite epoxidado en la parte superior, así pues, primero se vaciará la parte acuosa en un depósito y después se cambiará el depósito para almacenar el aceite epoxidado.

Como en la reacción de epoxidación salen 419,10 kg de fase acuosa y orgánica para realizar esta separación se decide utilizar un decantador de acero inoxidable de 500 L de capacidad, modelo Decantador inox fondo cónico 500 L–Maquinaria Aroma. Este equipo está fabricado en acero inoxidable AISI 304, dispone de un fondo cónico a 60° y cuenta con grifos de descarga total y parcial, lo que facilita la separación eficiente de las dos fases resultantes: la fase acuosa ácida y la fase orgánica correspondiente al aceite epoxidado [37].

Las dimensiones aproximadas del decantador son 0,9 m de diámetro y 1,5 m de altura.

6.1.2.2.2 Depósito residuos epoxidación

Una vez tanto el aceite epoxidado como la fase acuosa de la epoxidación se han separado por gravedad en el decantador, debajo queda la parte acuosa ya que esta tiene una densidad mayor que el aceite. Por tanto, se vacía el decantador con una válvula en la parte inferior hasta que tan solo quede en el decantador aceite.

6. Estudio económico

Para saber el volumen necesario para el depósito de residuos de epoxidación utilizamos la ecuación (17):

$$V_{Fase\ acuosa} = V_{RE} - V_{AE} \quad (17)$$

Siendo:

V_{Fase acuosa}: Volumen fase acuosa (L).

V_{RE}: Volumen del reactor de epoxidación (L).

V_{AE}: Volumen aceite epoxidado (L).

Si sustituimos en la ecuación obtenemos:

$$V_{Fase\ acuosa} = 419,10 - 186,24 = 232,86\ L$$

El volumen total por ciclo de epoxidación será de 232,86 L para calcular el volumen de residuos totales a la semana en la siguiente (18):

$$V_{Fase\ acuosa\ Semanales} = V_{Fase\ acuosa} \cdot 2\ ciclos \cdot 5\ días \quad (18)$$

Sustituyendo en la ecuación obtenemos el volumen total de residuos generados en una semana laboral.

$$V_{D-E4} = 232,86 \cdot 2 \cdot 5 = 2.328,60\ L$$

Se generará un total de 2328,6 L a la semana de residuos que serán almacenados en depósitos de polietileno de alta densidad (PEAD) especiales para residuos de 1000 L de capacidad, por lo tanto, contaremos con 3 depósitos IBC de 1000 litros [38]. Estos serán almacenados para semanalmente recogerlos una empresa de gestión de residuos.

6.1.2.2.3 Depósito de aceite epoxidado

Para el depósito de EHO el volumen es igual a la parte orgánica de la epoxidación, es decir, una vez se separa el aceite de la parte acuosa. Por tanto, en la ecuación (19) obtenemos el volumen necesario para el depósito de aceite epoxidado que es el mismo que el de aceite virgen.

$$V_{D-E5} = V_{aceite} \quad (19)$$

Siendo:

V_{D-E5} : Volumen depósitos de almacenamiento EHO (L)

V_{aceite} : Volumen de aceite (L)

Como todo el aceite virgen que entra al reactor se convierte en aceite epoxidado, se necesitan almacenar tras la epoxidación 186,24 L de EHO. Es por ello que se escoge un depósito de 350 L de acero inoxidable.

6.1.2.2.4 Depósito de limpieza reactores

Una vez realizado el ciclo de epoxidación completo, tras la descarga del EHO y de la parte acuosa en sus respectivos depósitos se debe limpiar el reactor con acetona.

La acetona se va a añadir en el reactor con una agitación de 300 rpm durante 30 minutos con una cantidad de 100 L. Esta se va a recircular cada vez que se deba volver a limpiar durante una semana y al cabo de una semana se va a almacenar en un bidón de residuos para gestionarla de manera adecuada y se reemplazará por una nueva. Para ello es necesario tener un depósito de 150 L con un diámetro de 0,45 m y una altura de 0,9 m, así como también se deberá tener en cuenta un depósito para su gestión de residuos.

6.1.2.3 Diseño reactor de maleinización

6.1.2.3.1 Silo de anhídrido maleico

El anhídrido maleico se almacena en un silo, ya que este a temperatura ambiente se encuentra en estado sólido. El silo se sitúa encima del reactor para que caiga por gravedad en el reactor.

Para realizar la maleinización, el anhídrido maleico se debe introducir en el reactor con una relación molar respecto al aceite de (2,7:1). Se establece que el reactor de maleinización hará un ciclo por semana y que para realizar la producción de 40 baldosas diarias a la semana se necesitan 412,03 kg de aceite de cáñamo maleinizado. Siguiendo la relación molar del anhídrido maleico en la ecuación podemos ver la cantidad de anhídrido maleico necesario semanalmente y por lo tanto el volumen mínimo necesario de silo de anhídrido.

$$V_{S-M1} = \frac{m_{am} \cdot 0,027}{0,1} \quad (20)$$

Siendo:

V_{S-M1}: Volumen del silo de anhídrido maleico (L)

m_{am}: masa necesaria de aceite maleinizado semanal (kg)

Si se aplica la ecuación se obtiene:

$$m_{S-M1} = \frac{412,03 \cdot 0,027}{0,1} = 111,25 \text{ Kg}$$

La densidad del anhídrido maleico es de 1,48 kg/L, si se divide la masa obtenida entre la densidad del compuesto se obtiene un volumen de 75,17 L.

En función de la masa mínima necesaria obtenida, se escoge un silo de acero inoxidable de 150 L con un diámetro de 0,6 m y una altura de 1,2 m.

6.1.2.3.2 Reactor de maleinización

Otra de las etapas esenciales en nuestro proceso productivo es la reacción de maleinización, ya que el aceite de cáñamo maleinizado sirve como endurecedor para nuestro producto final.

El reactor de maleinización se dimensionará teniendo en cuenta el balance de materia de los reactivos y los productos finales, ya que, en este caso, no se ha estudiado la cinética de la reacción de epoxidación. En esta etapa también se trabajará con un reactor discontinuo de tanque agitado (RDTA). Este, tendrá dos corrientes de entrada y una de salida. Al reactor entrarán el aceite de cáñamo virgen y el anhídrido maleico (AM) y como producto se obtendrá el aceite de cáñamo maleinizado (MHO).

Teniendo en cuenta las cantidades estequiométricas previamente calculadas, se deberán introducir 412,03 kg de aceite virgen y 111,25 kg de anhídrido maleico en cada ciclo.

Sabiendo que la densidad del aceite virgen es de 0,88 kg/L y la densidad del anhídrido maleico es de 1,48 kg/L se calcula la densidad de la mezcla:

$$\rho_{(MHO)} = \rho_{ac} \cdot w_{ac} + \rho_{AM} \cdot w_{AM} \quad (21)$$

Siendo

ρ_{MHO} : densidad del aceite de cáñamo maleinizado (kg/L)

ρ_{AC} : densidad del aceite de cáñamo virgen (kg/L)

w_{AC} : fracción másica del aceite de cáñamo

ρ_{AM} : densidad del anhídrido maleico (kg/L)

w_{AM} : fracción másica del anhídrido maleico

Sustituyendo en la ecuación obtenemos:

$$\rho_{(MHO)} = 0,88 \cdot 0,79 + 1,48 \cdot 0,21 = 1,01 \text{ kg/L}$$

Sabiendo que la densidad de la mezcla es de 1,01 kg/L, se calcula el volumen mínimo necesario del reactor.

$$V_{RM} = \frac{523,28 \text{ kg}}{1,01 \text{ kg/L}} = 518,10 \text{ L}$$

En base al resultado del volumen, se decide realizar el proceso en un reactor agitado encamisado con una capacidad total de 600 litros, diseñado de acero inoxidable con un diámetro de 0,9 m y una altura de 1,1m

La elección de este tamaño de reactor se basa en el volumen requerido por ciclo de producción en la reacción de maleinización. Además, este volumen proporciona un margen operativo suficiente para que la agitación se pueda llevar a cabo de manera correcta.

El reactor está fabricado en acero inoxidable AISI 304, Siendo las principales especificaciones técnicas del reactor de 600 L descritas en la Tabla 15.

Tabla 15. Especificaciones del reactor de maleinización

Especificaciones	Valor
Capacidad nominal (L)	600
Presión de trabajo (bar)	6
Temperatura máxima (°C)	300
Potencia (kW)	7,5
Velocidad de agitación (rpm)	500

El control de la temperatura de reacción se realiza de forma automática mediante un sistema de lazo cerrado que incluye un transmisor de temperatura (TT), un controlador de temperatura (TC) y una válvula de control neumática que regula el flujo de fluido térmico en la camisa del reactor. Esto asegura una regulación precisa de la temperatura, evitando desviaciones que puedan comprometer la calidad del producto final.

La velocidad de agitación también se regula de manera automática para garantizar una correcta mezcla de reactivos y una transferencia de calor homogénea. El sistema de control incorpora además sensores de presión y dispositivos de seguridad, que permiten operar dentro de las condiciones especificadas sin riesgo para el equipo ni para los operarios.

Una vez finalizada la reacción de maleinización, el producto se descarga de manera controlada hacia un silo de almacenamiento intermedio, desde donde se gestionará su posterior procesamiento en las etapas de formulación de resina.

6.1.2.3.3 Depósito de aceite maleinizado

Una vez finalizado el proceso de maleinización en el reactor, el aceite de cáñamo modificado se transfiere de manera automática a un depósito de almacenamiento intermedio, donde permanecerá hasta su utilización en las etapas posteriores del proceso de formulación de la resina termoestable.

Suponemos que no existen pérdidas durante la reacción, por tanto, el aceite maleinizado a almacenar será el mismo que a la salida del reactor, es decir de 412,03 kg. El volumen del depósito seleccionado ha sido de 700 L. Ligeramente superior a la capacidad del reactor de maleinización (600 L), para garantizar un margen de seguridad del 10 - 15% que permita evitar el sobrellenado y facilitar las operaciones de trasvase y limpieza.

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

6. Estudio económico

último, contiene un agitador en forma de paleta con un motor para que la mezcla de los componentes se realice de forma efectiva.

6.1.2.4 Comparativa silos y depósitos utilizados en la etapa 2

En la Tabla 16 se muestra una comparativa de las dimensiones de los depósitos de almacenamiento necesarios para llevar a cabo la etapa 2.

Tabla 16. Comparativa de los depósitos necesarios para la etapa 2 del proceso

Dimensiones	D-E1	D-E2	D-E3	D-E4	D-E5	D-L	D-M1
Altura (m)	1,2	2,35	0,9	1,42	1,2	0,9	1,25
Diámetro (m)	0,6	1,2	0,45	94,5	0,6	0,45	0,85
Volumen (L)	350	2.500	150	1.000	350	150	700

En la Tabla 17 se muestra una comparativa de las dimensiones de los silos de almacenamiento de sólidos para la etapa 2.

Tabla 17. Silo de almacenamiento para la etapa 2

Dimensiones	Silo anhídrido maleico (S-M1)
Volumen (L)	150
Altura (m)	1,2
Diámetro (m)	0,6

6.1.3 ETAPA 3: Procesado de las baldosas

Finalmente, una vez se tienen todos los reactivos necesarios para producir el termoestable se pasa a la etapa 3, donde se procesan las baldosas. En la Figura 43 se muestra un diagrama de flujo de esta última etapa. Para realizar el dimensionado de los equipos utilizados es importante recalcar que se van a hacer 2 procesados por turno, es decir 4 procesados diarios, con un total de 40 baldosas diarias.

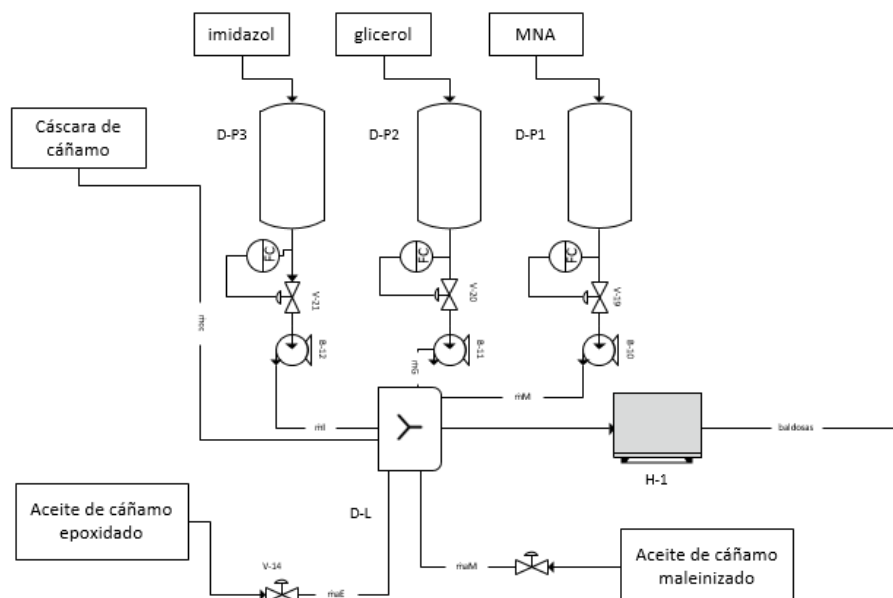


Figura 43. Diagrama de procesos de la etapa 3 del proceso productivo

6.1.3.1 Diseño de tanques de almacenamiento para reactivos

En esta última etapa, para realizar el entrecruzado de las baldosas es necesario tener depósitos de almacenamiento de las resinas, de los endurecedores tanto bio como petroquímico, catalizador y acelerador para poder formar el termoestable. En este apartado se describirán cada uno de ellos y sus respectivas dimensiones, para ello se va a partir de las cantidades necesarias de cada reactivo para producir una baldosa, estas quedan descritas en la Tabla 18.

Tabla 18. Composición para la producción de una baldosa

Composición baldosa		
Componentes	fracción (*1)	masa (kg)
EHO	0,51	8,92
MNA	0,35	6,16
MHO	0,12	2,06
glicerol	0,01	0,13
imidazol	0,02	0,34
carga	0,1	1,96
TOTAL		19,57

Cabe destacar que en este apartado no están dimensionados ni el silo de cáscara de cáñamo ni los depósitos de aceite de cáñamo epoxidado y maleinizado ya que se han dimensionado en las etapas donde se producen. No obstante, si se deben tener en cuenta para la mezcla.

6. Estudio económico

6.1.3.1.1 Depósito de MNA

Para saber el volumen del depósito de MNA sabemos que se necesitan 6,16 kg de MNA para la producción de una baldosa. Teniendo en cuenta que los reactivos se van a recibir una vez a la semana debemos saber cuantos procesados se realizan durante una semana. En cada procesado de 4 horas se producen 10 baldosas y diariamente se trabaja 2 turnos de 8 horas durante 5 días laborales a la semana, por lo tanto:

$$m_{MNA} = 6,16 \frac{kg}{baldosa} \cdot 10 \text{ baldosas} \cdot 2 \text{ procesados} \cdot 2 \text{ turnos} \cdot 5 d = 1232 \frac{kg}{semana}$$

Sabiendo que la densidad del MNA es de 1,48 kg/L:

$$V_{D-P1} = \frac{1.232 \text{ kg}}{1,48 \frac{kg}{L}} = 832,43 \text{ L}$$

Como mínimo se necesita un volumen para el depósito de MNA de 832,43 L. Se decide instalar un depósito de 1000 L de acero inoxidable con un diámetro de 1 m y una altura de 1,25 m.

6.1.3.1.2 Depósito de glicerol

Para saber el volumen del depósito de glicerol sabemos que se necesitan 0,13 kg de glicerol para la producción de una baldosa. Teniendo en cuenta que los reactivos se van a recibir una vez a la semana debemos saber cuantos procesados se realizan durante una semana. En cada procesado de 4 horas se producen 10 baldosas y diariamente se trabaja 2 turnos de 8 horas durante 5 días laborales a la semana, por lo tanto:

$$m_{glicer} = 0,13 \frac{kg}{baldosa} \cdot 10 \text{ baldosas} \cdot 2 \text{ procesados} \cdot 2 \text{ turnos} \cdot 5 d = 26 \frac{kg}{semana}$$

Sabiendo que la densidad del glicerol es de 1,26 kg/L:

$$V_{D-P2} = \frac{26 \text{ kg}}{1,26 \frac{kg}{L}} = 20,6 \text{ L}$$

Como mínimo se necesita un volumen para el depósito de glicerol de 20,6 L. Se decide instalar un depósito de 100 L de acero inoxidable con un diámetro de 0,5 m y una altura de 0,6 m.

6.1.3.1.3 Depósito de imidazol

Para saber el volumen del depósito de imidazol sabemos que se necesitan 0,34 kg de imidazol para la producción de una baldosa. Teniendo en cuenta que los reactivos se van a recibir una vez a la semana debemos saber cuantos procesados se realizan durante una semana. En cada procesado de 4 horas se producen 10 baldosas y diariamente se trabaja 2 turnos de 8 horas durante 5 días laborales a la semana, por lo tanto:

$$m_{imid} = 0,34 \frac{kg}{baldosa} \cdot 10 \text{ baldosas} \cdot 2 \text{ procesados} \cdot 2 \text{ turnos} \cdot 5 \text{ d} = 68 \frac{kg}{semana}$$

Sabiendo que la densidad del imidazol es de 1,48 kg/L:

$$V_{D-P3} = \frac{68 \text{ kg}}{1,03 \frac{kg}{L}} = 66,02 \text{ L}$$

Como mínimo se necesita un volumen para el depósito de imidazol de 66,02 L. Se decide instalar un depósito de 100 L de acero inoxidable con un diámetro de 0,5 m y una altura de 0,6 m.

6.1.3.2 Comparativa de depósitos utilizados en la etapa 3

En la Tabla 19 se muestra una comparativa de las dimensiones de los depósitos de almacenamiento necesarios para llevar a cabo la etapa 3.

Tabla 19. Comparativa de los depósitos necesarios para la etapa 3 del proceso

Dimensiones	D-P1	D-P2	D-P3
Altura (m)	1,25	0,6	0,6
Diámetro (m)	1	0,5	0,5
Volumen (L)	1.000	100	100

6.1.3.3 Diseño de la línea de resinado

En lugar de contar con equipos individuales para cada etapa del proceso se ha optado por una línea integral que agrupa todas las fases necesarias para el procesado de las baldosas. El proceso de resinado se compone de las siguientes etapas principales:

1. **Carga de las tablas:** Las tablas donde posteriormente se añadirán las resinas son colocadas en la línea.

2. **Limpieza y secado:** Las superficies de las tablas se someten a un proceso de limpieza y secado en horno para eliminar polvo, humedad y contaminantes que puedan interferir con la correcta adhesión de la resina.
3. **Aplicación de la resina:** Los reactivos necesarios para el procesado de una baldosa se aplican de manera uniforme sobre las tablas de manera automática.
4. **Saturación y distribución:** Para asegurarse de que no quedan burbujas de aire y de que existe una buena homogeneidad en la muestra se utilizan mecanismos de vibración.
5. **Curado de la resina:** Una vez aplicada, la resina se somete a un proceso de entrecruzado térmico en un horno.
6. **Enfriamiento:** Tras el curado, las pasan por una fase de enfriamiento para estabilizar su temperatura y permitir su manipulación segura en las siguientes etapas del proceso.
7. **Descarga:** Finalmente, las baldosas son descargadas de la línea y quedan listas para almacenarlas con la transpaleta.

Se selecciona la línea de resinado modelo Breton Resin Lines, fabricada por la empresa italiana Breton S.p.A (Véneto, Italia) cuya imagen se puede ver en la Figura 44.

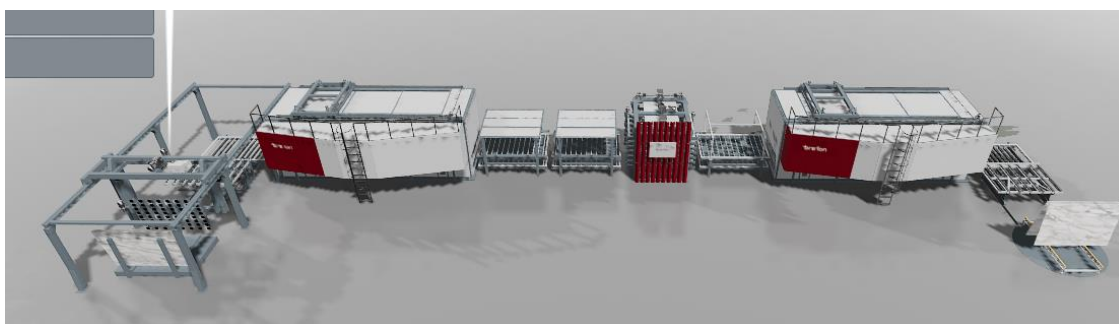


Figura 44. Distribución de los módulos de la línea de resinado de Breton para el procesado de las baldosas [39]

6.1.4 Equipos globales en todo el proceso

Para un buen funcionamiento de todo el proceso hay ciertos equipos auxiliares que regulan caudales o transporte que serán descritos en conjunto en este apartado, ya que siempre se utilizan los mismos modelos.

6.1.4.1 Bombas

Para este proceso se han seleccionado bombas centrífugas debido a su capacidad para convertir la energía mecánica en energía hidráulica, lo que permite trasladar grandes volúmenes de líquido de manera eficiente. Para poder utilizar la misma bomba durante todo el proceso se ha elegido una con un amplio rango de caudales cuyas características vienen descritas en la Tabla 20.

Tabla 20. Especificaciones generales de la bomba centrífuga [40]

Especificaciones	Bomba MS 07
Caudal (m ³ /h)	0,3 – 4,8
Presión de aspiración (mca)	5 - 36
Potencia (CV)	0,6

6.1.4.2 Válvulas

En este caso, se han seleccionado válvulas de bola ya que el proceso exige una apertura rápida y sencilla, además de minimizar al máximo las pérdidas de carga. Del mismo modo, estas válvulas deben ser capaces de resistir determinadas presiones y temperaturas relativamente altas las características generales de estas vienen descritas en la Tabla 21.

Tabla 21. Especificaciones generales de la válvula de bola [41]

Especificaciones	Válvula RS PRO
Material	Latón
Presión de trabajo (bar)	40
Rango de temperaturas (°C)	-40 - 170

6.1.4.3 Sensores

Todo el proceso se necesita mantener en control para evitar posibles pérdidas. Para ello, se utilizan una serie de sensores y controladores de caudal, nivel y temperatura que quedan descritos en la Tabla 22.

Tabla 22. Especificaciones generales de todos los controladores utilizados durante el proceso

Especificaciones	Controlador de temperatura	Controlador de caudal	Controlador de nivel	Controlador de presión
Rango de medida (L/min)	---	5 – 100	5 – 100	5 – 100
Rango de temperaturas (°C)	-70 - 600	-10 - 90	-10 - 100	----
Rango de presión (bar)	---	---	---	0,10

6.2 Cronograma del proceso productivo

Para poder visualizar de manera más clara el proceso productivo de las baldosas se va a realizar un diagrama de Gantt con el cronograma de las 3 etapas que componen todo el proceso productivo y poder así establecer el horario de jornada laboral.

La jornada laboral se fija en 8 horas diarias, existiendo dos turnos con diferentes operarios. El primer turno empieza a las 6:00 y termina a las 14:00 y el segundo empieza a las 14:00 y termina a las 22:00, de manera que ambos turnos se enlacen de forma directa, es decir, sin periodos intermedios entre ellos. Esto garantiza que las máquinas no sufran paradas innecesarias, especialmente aquellas que trabajan a temperaturas elevadas o que requieren un control térmico constante como pueden ser el horno o el reactor químico. Esta continuidad evita el riesgo de enfriamientos no deseados, solidificación de materiales en línea o desequilibrios térmicos que podrían afectar la calidad final del producto.

En primer lugar, se debe tener en cuenta para el comienzo de la semana laboral, dado que los lunes es cuando se recibe la mayor parte de las materias primas y para evitar que el proceso arranque con retraso, se han sobredimensionado los tanques de almacenamiento. Esto permite que el proceso

productivo pueda iniciarse a la vez que se van llenando los depósitos, garantizando la simultaneidad entre recepción de materia prima y producción.

El proceso productivo está dividido en tres grandes etapas, las cuales se han organizado de manera que puedan realizarse en paralelo durante la jornada laboral, maximizando así la productividad.

La primera etapa, la extrusión, que tiene una duración de siete horas de operación seguida de una hora adicional dedicada a la descarga del aceite extruido en los tanques de almacenamiento comenzando al inicio del primer turno y finalizando al término de la jornada laboral.

La segunda etapa corresponde a la reacción química con una duración de ocho horas continuas coincidiendo exactamente con el horario de la jornada completa desde las seis de la mañana hasta las dos de la tarde ajustándose perfectamente a los dos turnos sin necesidad de realizar paradas.

En cuanto a la tercera etapa consiste en los procesados finales que están compuestos por dos procesos consecutivos de cuatro horas cada uno permitiendo realizar dos por turno de modo que el primer procesado se desarrolla entre las seis y las diez de la mañana y el segundo entre las diez y las dos de la tarde.

En la Figura 45 se puede apreciar de manera visual todo el proceso productivo y la correcta diferenciación entre las 3 líneas principales de trabajo diarias. Sin contar el día que se realiza la maleinización ni las descargas de las materias primas.

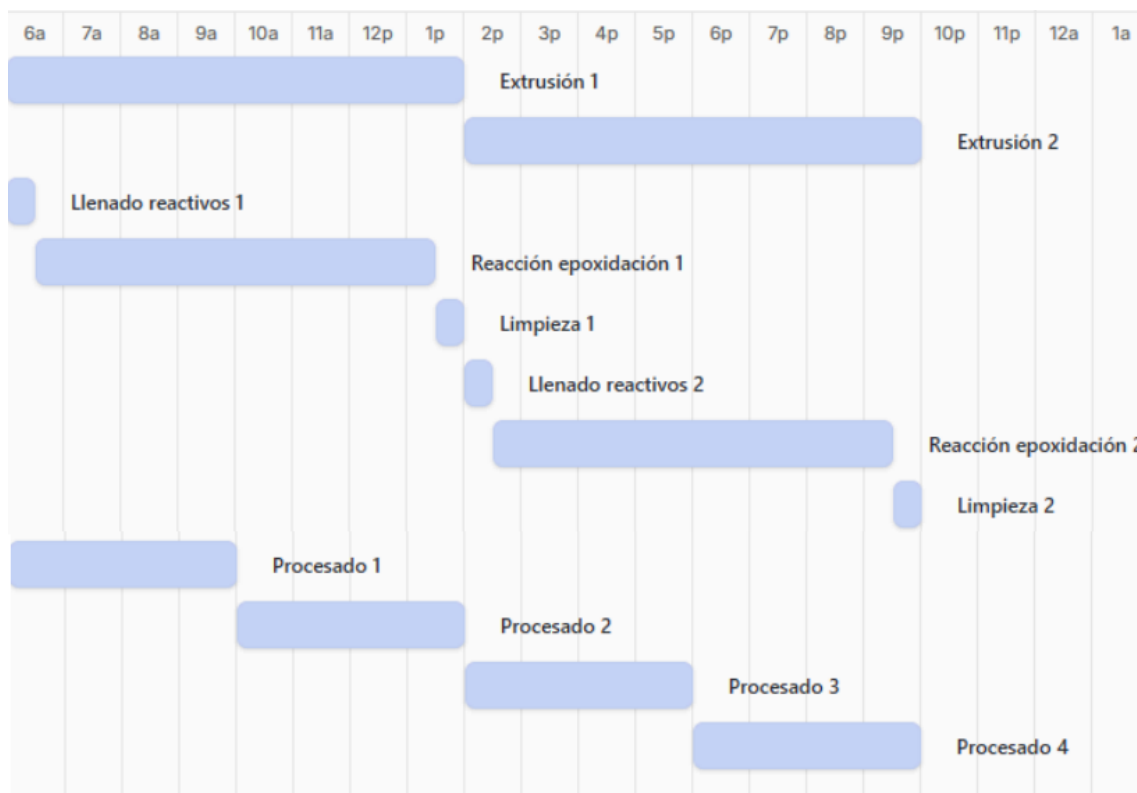


Figura 45. Diagrama de Gantt del proceso de producción de baldosas a partir de aceite de cáñamo epoxidado. Realizado con ClickUp

6.3 Estudio de viabilidad económica del proyecto

Finalmente, en este punto se pretende estudiar la viabilidad económica de una planta de producción de baldosas a partir de aceite de cáñamo epoxidado junto con aceite de cáñamo maleinizado y cargas de cáñamo para obtener un producto con elevado contenido bio.

Para ello, será necesario realizar el cálculo del coste de los materiales y reactivos, considerando las cantidades requeridas de cada uno. Además, se deberá incluir el coste asociado a los equipos utilizados en la producción, así como el gasto derivado del consumo energético, el coste del personal y el de la planta industrial seleccionada para la instalación de dichos equipos. Con el fin de evaluar la rentabilidad y conocer la amortización del proyecto.

Antes de comenzar el análisis económico, es necesario definir el calendario laboral anual. Considerando que un año tiene 52 semanas completas, y asumiendo una jornada laboral de lunes a viernes, se dispondría inicialmente de 260 días laborables ($52 \text{ semanas} \times 5 \text{ días laborables por semana}$). A este total, se le deben

6. Estudio económico

restar los 14 días festivos nacionales y locales, así como los 20 días de vacaciones anuales por trabajador, lo que deja finalmente un total de 226 días laborales efectivos al año.

6.3.1 Presupuesto materiales y reactivos

Para poder calcular el coste total de estos buscamos los precios de cada uno de ellos y mediante la cantidad previamente calculada de los materiales y reactivos que se necesitan se podrá saber el coste total de ellos anualmente.

En la Tabla 23, se muestra el coste del kg de producto y el consumo anual de este, siendo la última columna el coste anual que suponen los reactivos utilizados.

Tabla 23. Cantidades y costes de materiales y reactivos

Materia prima	Coste €/kg	Consumo (kg/año)	Coste (€/año)
semilla cáñamo	2,5	611.330	1.528.325
peróxido	1,0	919.59,4	91.959
ácido sulfúrico	1,5	497,2	746
maleico	1,3	5.028,0	6.536
acetona	1,2	4.520,0	5.424
glicerol	1,0	1.209,1	1.209
MNA	3,0	55.686,4	167.059
imidazol	4,0	3.060,0	12.240
TOTAL			1.813.499

6.3.2 Presupuesto equipos

Para describir el presupuesto de los equipos se agrupan según su utilidad, por una parte, tenemos los equipos de almacenamiento, por otra tenemos los equipos destinados al proceso productivo y finalmente los equipos auxiliares.

En primer lugar, dentro de los equipos de almacenamiento, se encuentran los depósitos y los silos que almacenan todos los reactivos necesarios para llevar a cabo el proceso.

En la Tabla 24 se muestran todos los depósitos y silos, con sus respectivos volúmenes, las unidades necesarias para cada reactor y el coste total que estos suponen.

Tabla 24. Coste equipos de almacenamiento

Equipos de almacenamiento	Dimensiones	Unidades	Coste total (€)
Silo semilla cáñamo	4.000 kg	4	6.560
Silo cáscara cáñamo	4.000 kg	1	1.640
Depósito aceite virgen	500 L	1	450
“Big Bag” venta cáscara	1.000 kg	15	45
Depósito CH ₃ COOH	350 L	1	315
Depósito H ₂ O ₂	2.500 L	1	2.260
Depósito H ₂ SO ₄	150 L	1	135
Depósito fase acuosa	1.000 L	3	2.700
Depósito epoxidado	350 L	1	315
Depósito maleinizado	700 L	1	630
Depósito limpieza	150 L	1	135
Silo anhídrido maleico	150 L	1	135
Depósito MNA	1.000 L	1	900
Depósito glicerol	100 L	1	90,5
Depósito imidazol	100 L	1	90,5
Coste total equipos de almacenamiento			16.401

A continuación, se describen los equipos principales del proceso productivo, en la Tabla 25 se muestran cada uno de ellos con sus respectivos costes.

Tabla 25. Costes equipos de producción

Equipos del proceso	Unidades	Coste unitario (€/ud)	Coste total (€)
Extrusora	1	2.750	2.750
Centrífuga	1	2.637,8	2.637,8
Trituradora	1	3.500	3.500
Reactor epoxidación	1	20.000	20.000
Reactor maleinización	1	20.000	20.000
Decantador	1	2.727	2.727
Línea de resinado	1	-	60.000
Transpaleta	2	560	1.120
Coste total equipos de producción			112.734,8

Finalmente, se analizarán los costes de los equipos auxiliares. En la Tabla 26 se encuentran todas las unidades utilizadas durante todo el proceso y el coste de estas.

Tabla 26. Coste equipos auxiliares

Equipos auxiliares	Unidades	Coste unitario (€/ud)	Coste total (€)
Válvulas	21	12,84	269,6
Bombas	11	256,0	2.816
Termómetro	3	166,4	499,3
Caudalímetro	12	340,0	4080,1
Controlador de nivel	2	571,1	1142,2
Manómetro	2	29,04	58,1
Coste total equipos auxiliares			8.865,4

El total del presupuesto para reactivos y equipos viene especificado en la Tabla 27.

Tabla 27. Resumen costes totales de reactivos y equipos

Coste reactivos (€)	Coste equipos principales (€)	Coste equipos auxiliares (€)	Coste total (€)
16.401	112.734,8	8.865,4	138.001,2

6.3.3 Presupuesto planta industrial

Para el establecimiento de la planta de producción de baldosas a partir de aceite de cáñamo modificado, como se observa en la Figura 46 se ha optado por la compra de un solar y la construcción de una nave industrial desde cero en la región de Extremadura, específicamente en la provincia de Badajoz en el polígono industrial El Prado de Mérida debido a varios factores.



Figura 46. Solar para la planta de producción de baldosas de cáñamo epoxidado en Extremadura

En primer lugar, esta zona cuenta con una amplia disponibilidad de terrenos agrícolas dedicados al cultivo de cáñamo industrial, lo que permite reducir considerablemente los costes de transporte y almacenamiento de la materia prima. Además, el precio del suelo industrial en Extremadura es notablemente más bajo que en otras regiones de España [42], lo que supone un ahorro inicial significativo en inversión de infraestructuras.

Por otro lado, la red de comunicaciones, especialmente las autovías que conectan la región con el resto de la península, garantizan una adecuada distribución de los productos terminados a nivel nacional. También es importante destacar el creciente interés de la comunidad autónoma por promover proyectos vinculados a la bioeconomía y la sostenibilidad, lo que podría facilitar el acceso a subvenciones o programas de ayuda específicos para iniciativas de economía circular.

Para garantizar el correcto desarrollo del proceso productivo de las baldosas a partir de aceite de cáñamo modificado, se ha llevado a cabo una estimación de la superficie necesaria tanto para la nave industrial como para el solar donde se ubicará la instalación.

Tras analizar el espacio requerido por los equipos productivos, extrusora, reactores, tanques de almacenamiento, líneas de procesado y envasado), así como las zonas auxiliares necesarias para el almacenamiento de materias primas y

6. Estudio económico

productos terminados, la circulación interna de transpaletas y la seguridad operativa, se estima una superficie construida de aproximadamente 600 m².

Esta superficie incluye tanto la zona de producción, como una zona administrativa y de control, que contará con una pequeña área de oficinas y servicios (vestuarios y aseos), con una superficie aproximada de 30 m² integrada dentro de la nave.

Adicionalmente, se ha considerado necesaria una zona exterior destinada a carga y descarga de materiales, almacenamiento temporal de productos y accesos para vehículos industriales, por lo que se prevé una superficie de patio de aproximadamente 400 m².

Teniendo en cuenta estos requerimientos, se ha estimado que el solar industrial deberá contar con una superficie total mínima de 1.000 m², lo que permitirá no solo la construcción de la nave y las zonas de servicio, sino también disponer de un margen suficiente para maniobras logísticas y futuras ampliaciones.

Se ha realizado una estimación económica detallada utilizando el método de Chilton. El cálculo parte del coste de los equipos principales, previamente calculados y valorados en 138.001 €, al que se le han aplicado coeficientes típicos de instalación, tuberías, instrumentación, obra civil y auxiliares, siguiendo los factores de ponderación habituales para plantas de complejidad media-baja ya que en nuestra producción no se trabaja con reactivos peligrosos, no se trabaja a presión ni se requiere de un mantenimiento exhaustivo. En la Tabla 28 se detallan los costes directos de la instalación.

Tabla 28. Costes directos de la instalación

Concepto	Factor	Coste (€)
Equipos principales	1	138.001
Equipos instalados	0,4	55.200
Tuberías (planta mixta)	0,1	5.520
Instrumentación (completa)	0,1	5.520
Edificios y preparación del terreno (planta interna)	0,6	33.120
Auxiliares (nueva extensión)	0,625	34.500
Líneas exteriores (unidad integrada)	0,025	1.380
Coste directo total		273.242

6. Estudio económico

El resultado es un coste directo total de 273.242 €, que incluye todos los elementos físicos necesarios para el funcionamiento de la planta, como la instalación de los equipos, la instrumentación de control, la red de tuberías de proceso, los servicios auxiliares y la construcción de la nave.

A este importe se han sumado los costes indirectos asociados a la ingeniería y construcción (22.201 €), la contingencia y beneficio del contratista (40.986 €), así como un factor corrector por tamaño de planta (6.831 €), lo que eleva el coste indirecto total a 70.018 €.

Finalmente, se ha considerado el coste de adquisición del terreno, presupuestado en 20.000 €, acorde a los precios actuales del suelo industrial en la zona de Extremadura seleccionada para el proyecto.

Con todo ello, el coste total final (CTF) del proyecto asciende a 363.260 €, incluyendo tanto los costes directos como indirectos y el terreno.

6.3.4 Presupuesto consumo energético

Para estimar el consumo energético total de la planta, es necesario partir del análisis de la potencia eléctrica requerida para cada equipo, teniendo en cuenta las horas diarias de funcionamiento. En la Tabla 29 se recogen tanto las potencias unitarias de cada equipo como la potencia total resultante, considerando aquellos casos en los que existen varias unidades de un mismo tipo de equipo.

Tabla 29. Equipos con sus respectivas potencias

Equipo	Potencia (kW)	unidades	Potencia total (kW)
Centrífuga	4	1	4,0
Extrusora	2,2	1	2,2
Trituradora	2,2	1	2,2
Reactor de epoxidación	0,55	1	0,55
Reactor de maleinización	1,5	1	1,5
Líneas de resinado	9	1	9,0
Bombas	0,447	11	4,9

Seguidamente, pasaremos a mostrar los valores de potencia diaria en kWh según las horas de funcionamiento de cada equipo y la potencia diaria consumida por estos. No obstante, el reactor de maleinización tan solo funciona una vez por

6. Estudio económico

semana durante 3 horas, por tanto, para realizar una estimación real, el valor que se dividirá entre 5 para calcularlo diariamente como si se utilizase la energía de un ciclo de manera proporcional durante la semana. En la Tabla 30 podemos ver los valores de potencia diaria de cada equipo.

Tabla 30. Potencia diaria equipos

Equipo	Potencia (kW)	Tiempo de funcionamiento (h)	Energía diaria (kW día)
Centrífuga	4,0	16	64,0
Extrusora	2,2	16	35,2
Trituradora	2,2	16	35,2
Reactor de epoxidación	0,55	16	8,8
Reactor de maleinización	1,5	3	0,9
Líneas de resinado	9,0	16	144,0
Bombas	4,9	1	24,4
TOTAL	24,4	-	312,5

Una vez se sabe 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. En la Tabla 31 observamos el consumo y la potencia requerida diariamente para la iluminación.

Tabla 31. Potencia diaria de iluminación

Material	Potencia (kW)	Tiempo funcionamiento (h)	Consumo diario (kW día)
Campana LED	2,4	16	38,4
Luz emergencia	0,081	24	1,944
TOTAL	2,48	-	40,34

Teniendo en cuenta tanto equipos como iluminación, la potencia necesaria mínima a contratar es de:

$$\text{Potencia mínima requerida} = 24,37 \text{ kW} + 2,48 \text{ kW} = 26,85 \text{ kW}$$

Y la energía consumida diariamente será de:

$$\text{Energía} = 312,47 \text{ kW día} + 40,34 \text{ kW día} = 352,81 \text{ kW día}$$

6. Estudio económico

Sabiendo que se trabaja durante 226 días al año:

$$\text{Energía} = 352,81 \text{ kW día} \times 226 \text{ días} = 79.735,06 \text{ kW año.}$$

Una vez se conoce el consumo de energía total anual, se deben tener en cuenta los gastos que suponen.

Una factura de luz industrial se divide en dos principales bloques, los gastos fijos (potencia contratada, alquiler del contador, impuestos sobre la electricidad, IVA) y por otra parte los gastos variables como el consumo real de energía (€/kW h).

En España, para consumos industriales con potencias superiores a 15 kW la tarifa de acceso más común es la 3.0TD.

Esta tarifa tiene 6 periodos horarios (P1 a P6), y para cada periodo, la normativa establece un precio diferente por cada kW de potencia contratada. Esto quiere decir que, dependiendo de la hora del día, la empresa paga más o menos por la potencia contratada. Según Iberdrola y la normativa vigente (RD 148/2021), los precios anuales por kW contratado para cada periodo son según la Tabla 32:

Tabla 32. Precios anuales por kW contratado para cada periodo

Periodo	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Precio (€/kW·año)	21,96	11,69	76,2	55,6	32,6	23,2

Realizando la media de todos los periodos se obtiene que el precio medio anual total por cada kW contratado si se contrata la misma potencia en todos los periodos es de 52,41 €/kW·año.

Para poder realizar una estimación lo más ajustada posible del coste energético de la planta, se ha utilizado como referencia el precio horario de la electricidad correspondiente al día 1 de julio de 2025, consultado a través de la plataforma online tarifaluzhora.es, que proporciona el precio de la electricidad por cada franja horaria en el mercado regulado (PVPC).

Dado que el consumo eléctrico de la planta se concentrará principalmente en el horario laboral, el cálculo se ha basado en obtener una media ponderada de los precios por kWh correspondientes únicamente a las horas de operación de la planta a lo largo de ese día como podemos observar en la Figura 47.

● 06:00 - 07:00	0.1374 €/kWh
● 07:00 - 08:00	0.1428 €/kWh
● 08:00 - 09:00	0.1604 €/kWh
● 09:00 - 10:00	0.1528 €/kWh
● 10:00 - 11:00	0.2069 €/kWh
● 11:00 - 12:00	0.1901 €/kWh
● 12:00 - 13:00	0.1888 €/kWh
● 13:00 - 14:00	0.1864 €/kWh
● 14:00 - 15:00	0.1213 €/kWh
● 15:00 - 16:00	0.1218 €/kWh
● 16:00 - 17:00	0.1341 €/kWh
● 17:00 - 18:00	0.147 €/kWh
● 18:00 - 19:00	0.222 €/kWh
● 19:00 - 20:00	0.2266 €/kWh
● 20:00 - 21:00	0.2367 €/kWh
● 21:00 - 22:00	0.2848 €/kWh

Figura 47. Precio de la luz por horas del día 1 de julio del 2025

Al realizar la media aritmética de todos los precios en las horas de producción, esta es igual a 0,18 €/kWh. Se tomará este valor para calcular el coste anual de electricidad.

Cálculo del coste variable (Consumo energético anual):

Sabiendo que se consumen 70.595,62 kWh anuales y que se estima que el precio de la energía es igual a 0,18 €/kWh:

$$\text{Coste anual por consumo} = 70.595,62 \text{ kWh} \cdot 0,18 \text{ €/kWh} = 12.707,21 \text{ €}$$

Cálculo del coste fijo (Consumo energético anual):

Como se requiere una potencia mínima de 26,85 kW, para realizar el cálculo, se ha considerado el precio medio anual por kW contratado, correspondiente a la tarifa eléctrica 3.0TD, aplicable a suministros de baja tensión con potencias superiores a 15 kW. Según los valores actuales de mercado y considerando la media de los diferentes periodos tarifarios (P1 a P6), el coste anual por kW contratado se sitúa en aproximadamente 52,41 €/kW·año.

6. Estudio económico

Por tanto, el coste fijo anual derivado de la potencia contratada se calcula mediante la potencia contratada multiplicada por el precio medio del término de potencia siendo:

$$\text{Coste fijo anual} = 26,85 \text{ kW} \cdot 52,41\text{€/kW}\cdot\text{año} = 1.407,21 \text{ €}$$

Este valor representa el coste fijo anual sin IVA, al cual se le deberá aplicar el 21% de impuestos y el valor final en la será el que deberá abonarse anualmente por disponer de la potencia eléctrica necesaria, con independencia del volumen de energía consumida durante el año. En la Tabla 33 se muestra el coste total con IVA.

Tabla 33. Coste electricidad anual con IVA

Coste variable (€)	Coste fijo (€)	Coste total (€) SIN IVA	Coste total (€) CON 21% IVA
12.707,21	1.407,21	14.114,42	17.078

6.3.5 Presupuesto personal

El presupuesto destinado al personal contempla todos los costes asociados a la contratación y mantenimiento de los recursos humanos necesarios para el correcto funcionamiento de las diferentes fases del proyecto.

En concreto, se van a necesitar 6 operarios que se encargarán de llevar a cargo la mayoría de los procesos productivos, 3 operarios por turno. Por otro lado, se dispondrá de 2 ingenieros químicos que se encargarán de realizar tareas más específicas como el control de la maquinaria, el ajuste de parámetro de producción o la optimización del rendimiento del proceso, en cada turno habrá un ingeniero. También se necesitará 1 administrativo responsable de la gestión documental y financiera. Finalmente, habrá un jefe de planta que coordine y supervise todas las actividades de producción, así como la calidad y seguridad de los trabajadores. En la Tabla 34 aparecen el coste de cada empleado por hora, así como su salario individual, finalizando con el coste total de salarios anuales empleados.

Tabla 34. Coste anual personal empleado

Cargo	Trabajadores	Sueldo (€/h)	Coste (€/año)
Jefe de Planta	1	30	54.240
Especialista	2	17	65.088
Operario	6	8	86.784
Administrativo	1	12	23.504
TOTAL	10	-	229.616

6.3.6 Presupuesto total

El presupuesto global necesario para la implantación y puesta en marcha de la planta de producción de cáñamo se ha calculado teniendo en cuenta todos los costes asociados a las distintas fases del proyecto que se muestran en la Tabla 35, la materia prima y los equipos para el proceso de producción, el emplazamiento, el coste energético y el salario de los empleados.

Tabla 35. Coste total de inversión

Presupuesto total	Coste (€/año)
Materia prima	1.813.499
Equipos	138.001
Planta industrial	205.259
Coste energético	17.078
Coste personal	229.616
Coste total inversión	2.403.453

6.3.7 Rentabilidad

Este apartado pretende estudiar los beneficios que se obtendrán y que precio mínimo tendrá el producto a partir de una serie de pasos que se estudiarán a continuación.

Para estudiar la rentabilidad de este proyecto se decide utilizar el método Chilton. Se trata de una técnica de estimación de costes de inversión industrial que permite calcular de manera aproximada el coste total de una planta industrial partiendo inicialmente del coste de los equipos principales.

La base del método consiste en aplicar una serie de factores multiplicativos (conocidos como factores de Chilton) sobre el coste de los equipos principales. Estos factores representan los distintos componentes necesarios para construir y poner en marcha una planta incluyendo los costes directos (instalación, obra civil, instrumentación, servicios auxiliares, etc.) y los costes indirectos (ingeniería, supervisión, licencias, etc.). Cada uno de estos conceptos tiene un factor de ponderación típico, que se ajusta según la complejidad y el tipo de proceso.

6.3.7.1 *Parámetros previos para calcular la rentabilidad*

Coste total del capital inmovilizado

El coste total del capital inmovilizado (también llamado inversión fija o capital fijo) se refiere a toda la inversión inicial que debe tener la empresa para poder afrontar los primeros meses de actividad, hasta que empiece a entrar dinero por ventas.

Este, se estima de forma simplificada como un porcentaje del coste directo e indirecto de la planta (es decir, del coste que incluye equipos, instalación, obra civil, instrumentación, tamaño, construcción, etc.).

La Tabla 36 muestra el resumen de los diferentes conceptos incluidos dentro de los costes directos (equipos, instalación, obra civil, instrumentación, servicios auxiliares, etc.) y los costes indirectos (ingeniería, supervisión, permisos y otros gastos generales de proyecto).

Tabla 36. Costes directos e indirectos

Concepto	Factor	Coste (€)
Equipos principales	1	138.001
Equipos instalados	0,4	55.200
Tuberías	0,1	5.520
Instrumentación	0,1	5.520
Edificios y preparación del terreno (planta interna)	0,6	33.120
Auxiliares	0,625	34.500
Lineas exteriores	0,025	1.380
Coste directo total		273.242
Ingeniería y construcción	0,08125	22.201
Contingencia y beneficio contratista	0,15	40.986
Factor tamaño	0,025	6.831
Coste indirecto total		70.018
Costes directos e indirectos		343.260

El coste del terreno es de 20.000 €, por lo tanto, el desembolso inicial es de 363.260 €.

Una vez determinados los costes directos, y siguiendo la metodología descrita, se procede al cálculo del capital circulante, estimado como un 20% del coste directo e indirecto total de la planta. Siguiendo la ecuación (22):

$$CC = DI \cdot f \quad (22)$$

Siendo:

CC = Capital circulante (€)

DI = Desembolso inicial (€)

f = factor capital circulante

Si se sustituye la ecuación se obtiene:

$$CC = 363.260 \cdot 0,2 = 72.652 \text{ €}$$

Inversión total inicial

Ahora ya conocidos los valores de CC y DI, se calcula la inversión inicial necesaria para poder empezar el proyecto siguiendo la ecuación (23):

$$I_0 = DI + CC \quad (23)$$

Al aplicar la ecuación obtenemos que:

$$I_0 = 363.260 + 72.652 = 435.912 \text{ €}$$

6.3.7.2 Parámetros clave para calcular la rentabilidad

Una vez determinados los parámetros económicos previos, el siguiente objetivo es establecer el coste mínimo del producto que permita que la planta industrial no genere pérdidas a lo largo de un periodo de 15 años de operación. Esto implica fijar un precio de venta que asegure que el Valor Actual Neto (VAN) sea igual a cero, garantizando así la viabilidad económica del proyecto. Posteriormente, se procederá al cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR), con el fin de conocer el porcentaje de rentabilidad que genera la inversión.

Antes de realizar el cálculo del VAN y la TIR, será necesario llevar a cabo un análisis detallado del flujo neto de caja del proyecto, considerando para cada ejercicio anual los ingresos previstos, los costes operativos, la amortización de activos y el beneficio neto esperado.

Flujo neto de caja

Para calcular el flujo neto de caja de la planta durante los 15 años de producción previstos, se deberán tener en cuenta el beneficio neto y la amortización ya que el flujo neto de caja es la suma de ambos parámetros. Para poder calcularlos se deberá seguir el siguiente procedimiento:

1. Se introducen los ingresos y los gastos de los próximos 15 años siendo los ingresos la venta de baldosas y la venta de cáscara de cáñamo especificados en la Tabla 37 .

Tabla 37. Ingresos anuales

Entrada monetaria	Productos anuales	Precio €/producto	Ingresos (€)
Producción Venta Baldosa	9.040	160,0	1.446.400
Producción Venta Carga	461.028,248	1,6	737.645
TOTAL			2.184.045

Y los gastos fijos referidos a la compra de materias primas, el coste de electricidad y el coste de los trabajadores siendo un total de gastos de 2.060.193 €.

- Para obtener los datos de los años posteriores se debe aplicar una relación de IPC (Índice de Precios y consumos) del 8,7% [43] siguiendo la ecuación (24). Esto se realiza ya que todos los años, el precio de los productos no se mantiene constante.

$$\epsilon_{año_i} = \epsilon_{año_{i-1}} \cdot (1 + IPC) \quad (24)$$

- Obtenidos los ingresos y costes en un periodo de 15 años, se calcula la amortización para cada año con la ecuación (25). Esta refleja la devaluación de los equipos e instalaciones por lo que a medida que pase el tiempo, tendrá un menor valor.

$$Amortización = CI \cdot r \cdot (1 - r)^{n-r} \quad (25)$$

Siendo:

CI: Capital inmovilizado (€)

r: La tasa de amortización (€)

Para calcular la tasa de amortización se requiere de otra ecuación (26):

$$r = 1 - \left(\frac{R}{CI}\right)^{\frac{1}{t}} \quad (26)$$

Donde:

R: Valor residual (1% del CI) (€)

t: Periodo de amortización (15 años)

n: Año de cálculo (años)

4. Como ya sabemos la amortización, podemos calcular el beneficio bruto con la ecuación (27) para posteriormente calcular el beneficio neto con la ecuación (28).

$$Beneficio_{bruto} = Ingreso - costes - amortización \quad (27)$$

$$Beneficio_{neto} = Beneficio_{bruto} \cdot (1 - IS) \quad (28)$$

Siendo el IS el impuesto de sociedad (15%)

5. Sabiendo el beneficio neto y la amortización podemos calcular el flujo neto de caja mediante la ecuación (29):

$$Flujo\ neto\ de\ caja = Beneficio_{neto} + amortización \quad (29)$$

Cálculo del VAN

El Valor Actual Neto (VAN) es uno de los principales indicadores económicos utilizados para determinar la viabilidad financiera del proyecto. Su objetivo es cuantificar la diferencia entre la inversión inicial y el valor presente de los flujos de caja futuros generados por la planta a lo largo de su vida útil. Un VAN positivo indica que el proyecto generará beneficios netos tras recuperar la inversión inicial, mientras que un VAN negativo reflejaría que el proyecto no sería rentable. Se calcula con la ecuación (30).

$$VAN = -I_0 + \sum \frac{CF_t}{(1 + i)^t} \quad (30)$$

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)

Según el análisis del flujo de caja y aplicando la ecuación del VAN, el proyecto presenta un VAN positivo de 237.709 €, lo que indica que, a la tasa de

descuento utilizada, la planta será capaz de recuperar la inversión inicial y generar beneficios adicionales a lo largo de los 15 años de operación previstos suponiendo que se venden las baldosas a 160 €. Este resultado confirma la viabilidad económica del proyecto. 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 151,85 €/kg de producto.

Cálculo del TIR

El TIR, o Tasa Interna de Retorno, representa el porcentaje de rendimiento anual que se espera obtener del proyecto a lo largo de su vida útil. Cuanto mayor es el TIR mejor es la inversión. Para calcularlo se aplica la ecuación (31):

$$0 = -I_0 + \sum \frac{CF_t}{(1 + i)^t} \quad (31)$$

Siendo i el tipo de interés para que el VAN sea nulo, TIR (%).

En nuestro caso el valor del TIR es del 26,78%, además, El plazo de recuperación o Payback que representa el tiempo necesario para que el proyecto recupere la inversión inicial a partir de los beneficios generados por la planta se alcanza en el sexto año, lo que significa que, a partir de ese momento, la planta empieza a generar beneficios netos acumulados.

6.3.8 Análisis de los resultados

Al analizar el mercado actual de baldosas termoestables de origen petroquímico, se observa que existen productos de gama alta cuyo precio por metro cuadrado supera ampliamente los 150 €/m², llegando en algunos casos a superar los 200 €/m², como ocurre con ciertos modelos de baldosas cerámicas de gran formato o de acabados especiales utilizados en arquitectura de interiores de alto nivel y proyectos de diseño exclusivo. Un ejemplo de ello son las baldosas de la gama "Rocalia Rojo" comercializadas por Lamosa/Azulemex, cuyo precio aproximado es de 219,90 €/m² [44], o las baldosas porcelánicas de diseño comercializadas por Santa Julia, que rondan los 120 €/m² a 150 €/m² dependiendo de acabados y espesores [45].

Observando estos precios, el producto bio desarrollado en este proyecto, con un coste de venta de 160 €/m², puede competir frente a estos productos de gama alta, especialmente si se tiene en cuenta su elevado porcentaje de contenido renovable (más del 78%).

Aunque las baldosas petroquímicas de gama alta pueden presentar mejores prestaciones superficiales en términos de dureza o resistencia química, el producto bio destaca por su mejor resistencia al impacto, así como por el valor añadido que supone el uso de materiales sostenibles. Además, el mercado de materiales de construcción está sufriendo un incremento progresivo en los costes de las materias primas fósiles, lo que podría acortar aún más la diferencia de precio entre ambas opciones en un futuro cercano.

Por tanto, la diferencia económica respecto a los productos de alta gama es mínima o incluso favorable para el producto bio, sobre todo si se considera la iniciativa actual de la gente a consumir materiales sostenibles, a pesar de tener que asumir un coste superior a cambio de reducir su impacto ambiental.

7 Conclusiones

Actualmente, la demanda de materiales de construcción sostenibles y la producción de composites con bajo impacto ambiental está creciendo de forma notable en los últimos años debido a la creciente preocupación social y a las exigencias normativas por la reducción de las emisiones y el uso de recursos fósiles. Numerosas investigaciones se están llevando a cabo con el fin de desarrollar materiales más respetuosos con el medio ambiente como resinas naturales, aceites vegetales, etc.

En este proyecto, se ha buscado no solo desarrollar un material biobasado a partir de la semilla de cáñamo, sino también minimizar la huella de carbono asociada a su proceso de fabricación, seleccionando métodos de procesado más sostenibles. Un ejemplo de ello ha sido la elección del prensado en frío como técnica de extracción del aceite de cáñamo, evitando así el uso de disolventes químicos y reduciendo el consumo energético.

Una vez se obtuvo el aceite de cáñamo, fue sometido a procesos de modificación química, concretamente de epoxidación y maleinización, aprovechando su elevada reactividad para unirse a otros compuestos, medida a partir del índice de yodo de este, siendo de 140 g I₂/ 100 g aceite. El objetivo de estas modificaciones químicas era la obtención de resina epoxi y endurecedor biobasado, necesarios para formular el termoestable.

De manera complementaria, se realizó un estudio cinético detallado del reactor de epoxidación, lo que permitió modelar el comportamiento de la reacción y obtener la expresión matemática de la velocidad de reacción en función de la concentración de los reactivos principales (dobles enlaces insaturados), permitiendo obtener las constantes de velocidad y finalmente el tiempo de residencia óptimo de epoxidación de 7 horas para así dimensionar el reactor de epoxidación para la planta industrial propuesta y establecer las condiciones operativas más eficientes.

Además, para poder aprovechar de manera integral la semilla de cáñamo, la cáscara resultante tras el proceso de extrusión se incorporó como carga lignocelulósica en la matriz del material final, aumentando así el contenido

renovable del producto hasta alcanzar un 69,15% de materia prima de origen bio.

Una vez obtenida la formulación final, se llevaron a cabo ensayos de caracterización mecánica y térmica, comparando los resultados obtenidos con los de baldosas termoestables comerciales de origen petroquímico. Los resultados mostraron que, aunque el material bio presenta una dureza ligeramente inferior, su resistencia al impacto es superior, gracias a la flexibilidad aportada por la carga de cáñamo. Tras comparar las distintas formulaciones, se determinó que las probetas con un 10% de carga ofrecían el mejor balance entre resistencia mecánica y absorción de agua, por lo que esta formulación fue seleccionada como la más adecuada para su escalado industrial.

A su vez, se realizó el diseño de la planta industrial, dimensionando los equipos necesarios y calculando los costes de implantación y operación mediante el método Chilton, incluyendo tanto los costes directos, costes indirectos como el capital circulante. La producción establecida para la planta es de 40 baldosas de 1 m² al día, lo que garantiza un volumen suficiente para alcanzar la capacidad mínima de comercialización prevista y cubrir la demanda estimada para justificar la inversión.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis económico a 15 años, obteniendo un VAN positivo de 237.709 €, una TIR del 26,78% y un plazo de recuperación (Payback) de 6 años, lo que demuestra la viabilidad económica del proyecto.

Desde el punto de vista comercial, se comparó el precio estimado de venta del producto bio (160 €/m²) con el de baldosas termoestables de gama alta de origen petroquímico, cuyos precios oscilan entre 120 y 220 €/m², concluyendo que el producto desarrollado se sitúa en un rango competitivo, especialmente teniendo en cuenta su elevado contenido renovable, su menor huella ambiental y la creciente tendencia del mercado hacia soluciones sostenibles.

Para concluir, este proyecto demuestra que el aceite de cáñamo, modificado y procesado, es una materia prima con gran potencial para la fabricación de materiales de construcción sostenibles, favoreciendo el desarrollo de una industria futura de menor impacto ambiental.

8 Referencias

1. (PEMRG), P., *Plastics - the Facts* 2022. 2022.
2. (PEMRG), P., *Plastics-the fast Facts* 2024. 2024.
3. Fombuena, V., *Guion prácticas de ciencia y tecnología de biopolímeros. Ciencia y tecnología de biopolímeros.* . 2022.
4. Kabasci, S., *Biobased plastics*, in *Plastic Waste and Recycling*. 2020. p. 67-96.
5. Reddy, M.M., et al., *Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities*. *Progress in Polymer Science*, 2013. **38**(10-11): p. 1653-1689.
6. Ansink, E., L. Wijk, and F. Zuidmeer, *No clue about bioplastics*. *Ecological Economics*, 2022. **191**.
7. Sánchez, L., *Tema 13: Polímeros termoestables. Asignatura de ampliación de ciencias de materiales*. 2022.
8. Bircă, A., et al., *Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers*, in *Materials for Biomedical Engineering*. 2019. p. 1-28.
9. Gandini, A., *Polymers from plant oils*. 2015: Smithers Rapra.
10. Fox, N. and G.J.T.i. Stachowiak, *Vegetable oil-based lubricants – a review of oxidation*. 2007. **40**(7): p. 1035-1046.
11. Domínguez Candela, I., *Hacia una economía circular: revalorización de productos de la semilla de salvia hispanica l. En el sector de los biopolímeros*. 2023, Universitat Politècnica de València.
12. Ranganathan, S., V.J.R.C. Sieber, and Engineering, *Development of semi-continuous chemo-enzymatic terpene epoxidation: combination of anthraquinone autooxidation and the lipase-mediated epoxidation process*. 2017. **2**(6): p. 885-895.
13. Lerma Cantó, A., *Revalorización de subproductos procedentes de la semilla del cáñamo (Cannabis sativa) para la obtención de biomateriales respetuosos con el medio ambiente*. 2024, Universitat Politècnica de València.
14. Pérez Nakai, A., *Desarrollo de nuevos materiales poliméricos y compuestos ecoeficientes basados en principios activos provenientes de la nuez de Brasil*. 2024, Universitat Politècnica de València.
15. Alonso Esteban, J.I., *El cáñamo (Cannabis sativa L.): usos tradicionales e interés de sus semillas en alimentación y salud*. 2021.
16. Irakli, M., et al., *Effect omicronf Genotype and Growing Year on the Nutritional, Phytochemical, and Antioxidant Properties of Industrial Hemp (Cannabis sativa L.) Seeds*. *Antioxidants (Basel)*, 2019. **8**(10).
17. Burton, R.A., et al., *Industrial hemp seed: from the field to value-added food ingredients*. *J Cannabis Res*, 2022. **4**(1): p. 45.
18. Bonini, S.A., et al., *Cannabis sativa: A comprehensive ethnopharmacological review of a medicinal plant with a long history*. *J Ethnopharmacol*, 2018. **227**: p. 300-315.
19. Rusu, I.E., et al., *Advanced Characterization of Hemp Flour (Cannabis sativa L.) from Dacia Secuieni and Zenit Varieties, Compared to Wheat Flour*. *Plants (Basel)*, 2021. **10**(6).
20. Timberplan. *Diseño en madera, Guías y consejos sobre madera*. 2015 15 de Julio; Available from: <https://timberplan.es/que-es-el-wpc/>.
21. Peidro, I.B., *Utilización de residuos de semilla de chía como cargas en polímeros termoplásticos* 2021.
22. Martínez, M.L., et al., *Chia (Salvia hispanica L.) oil extraction: Study of processing parameters*. 2012. **47**(1): p. 78-82.

8. Referencias

23. Ixtaina, V.Y., et al., *Characterization of chia seed oils obtained by pressing and solvent extraction*. 2011. **24**(2): p. 166-174.
24. Uribe, J.A.R., et al., *Extraction of oil from chia seeds with supercritical CO₂*. 2011. **56**(2): p. 174-178.
25. Fombuena, V. and S.J.J.o.t.A.O.C.S. MD, *Study of the properties of thermoset materials derived from epoxidized soybean oil and protein fillers*. 2013. **90**(3): p. 449-457.
26. Leveneur, S., et al., *Kinetic study and modeling of peroxypropionic acid synthesis from propionic acid and hydrogen peroxide using homogeneous catalysts*. 2008. **47**(3): p. 656-664.
27. Westfalia, F. Proveedor centrífuga. Available from: <https://www.foeth.com/es/centrifugas/separadores/>.
28. Centrífuga industrial. Available from: <https://www.inoxpa.es/productos/equipos/separadoras-centrifugas/separadoras-centrifugas-para-lacteos#accept>.
29. Extrusora de aceite modelo MS6YL-70H.; Available from: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Food-safety-olive-oil-mill-for-60793854334.html>
30. Máquina extrusora de un solo tornillo. Available from: <https://andexport.com/producto/maquina-extrusora-de-un-solo-tornillo/>.
31. Silo para almacenamiento de sólidos. Available from: <https://gandariaspain.com/es/productos/silos/silos-granja/>.
32. Sacos de almacenamiento tipo "big bag". Available from: https://www.bigbagstore.eu/es/Big-Bag-1-000-kg-90x90x110cm-Open-top-closed-bottom?https://www.bigbagstore.eu/es?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=p.max&utm_content=pmax_es&partner=G_ADS&camid=21646100102&gad_source=1&gad_campaignid=21646101263&gbraid=0AAAAACpNmCEnjSd2v52CZn3wseJrGYJM0&gclid=Cj0KCQjw1JjDBhDjARIsABIM2SvPGDPiU29ASGRROtZyYxQGmd2l7EvE3V5uI3kuVuplQqCGQAYRIsAaAqp8EALw_wcB.
33. Trituradora modelo H-4199. Available from: <https://www.humboldtmg.com/soil-grinder.html>.
34. Depósito de acero inoxidable de almacenamiento para materias primas. Available from: <https://www.tiendainvia.com/es/cerrado-fondo-plano-inclinado-con-camisa/2507-10000-standard-fpi.html>.
35. Reactor discontinuo de tanque agitado (RDTA). Available from: https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/product/mm/ga142611?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=21606318623&utm_content=167895033322&gad_source=1&gad_campaignid=21606318623&gbraid=0AAAAAD8kLQSEhRw1zgxo6M_0Hrp50uC89&gclid=Cj0KCQjw1JjDBhDjARIsABIM2StUm1QBO6U3F7lKBqfGBjUi4LMwrUC9xPCbfynH_nAoFdlyFGlVw2AaAi03EALw_wcB.
36. Reactor encamisado de acero inoxidable y con agitación. Available from: <https://www.alibaba.com/product-detail/500l-1000l-stainless-steel-jacketed-reactor-1600207783847.html>.
37. Decantador de acero inoxidable. Available from: <https://maquinariaroma.com/p/decantador-para-aceite-100-230-330-420-530-l-inox>.
38. Depósitos residuos

8. Referencias

39. *Línea de resinado Breton.* Available from: https://breton.it/es_eu/products/maquinas-y-lineas/breton-resin-lines.
40. *Bomba centrífuga multicelular modelo MS 07.*; Available from: <https://ferreidea.com/114690p-bomba-centrifasicaga-multicelular-ms07-m-06-cv-1-x-230-v-eb10002>.
41. *Válvula de retención hidráulica RS PRO.* Available from: <https://es.rs-online.com/web/p/valvulas-hidraulicas-antirretorno/3244966>.
42. *Disminución del precio de suelo en Extremadura.* Available from: <https://merida.es/el-gobierno-de-espana-rebaja-el-precio-del-suelo-del-poligono-industrial-sepes-en-el-prado-a-peticion-del-alcalde-de-merida-para-atraer-a-mas-empresas-a-la-ciudad/>?
43. *Tasa de variación anual del IPC.*
44. *Baldosas Rocalia Rojo.* Available from: https://azulemex.com/collections/piso/lamosa?srsId=AfmBOoobEi12ymdoX100Fmk9mjT_2RqtAPzurP1psDNwb97mRZhIF6OF.
45. *Productos cerámicos Santa Julia.* Available from: <https://www.ceramicasj.com/productos-ceramica-sj.html>.

9 Anexos

9.1 Comunicaciones científicas

Es importante destacar que el presente trabajo se llevó a cabo en el marco de una contratación de prácticas en el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA). Gracias a ello, se ha brindado la oportunidad de mostrar parte del trabajo realizado en un congreso:

XII Congreso I+D+i Campus d'Alcoi "Creando Sinergias", celebrado el días 3 de julio en Alcoy de 2025 con el título del trabajo "Estudio de las condiciones de obtención y procesado de un material compuesto basado en compuestos activos del cáñamo (*Cannabis Sativa*)".

9.2 Script archivos Matlab

ODEs_opt_24_25

```
% (C) 2016 Salvador C. Cardona

function dYdX = ODEs_opt_24_25(X,Y,b,param)

% Automatically extract parameters from param structure

nombres_variables = fieldnames(param);
longitud_param = length(nombres_variables);
for i = 1:longitud_param
    eval([nombres_variables{i}, '=param.', nombres_variables{i}, ';']);
end

% Assign generic fitting parameters b to the particular one

k1 = b(1);
k2 = b(2);

% Assign generic independent variable X to the particular one

Tiempo = X;

% Assign generic dependent variables Y to the particular ones

Oxigeno = Y(1);

% Define additional variables for writting the ODE system more easily

protones = 2.85E-5;
aceite = 0.218189 + (5.2176656-Oxigeno);
peroxido = 2*5.2176656-(Oxigeno-0.218189);
epox = Oxigeno;

% Write the ODE system

% dYdX = -(k1.*protones.*((aceite.*peroxido)-(1./k2).*epox)) ;
dYdX = (k1.*protones.*((aceite.*peroxido)-(1./k2).*epox)) ;

% Cionstantes fijas:

% dYdX = (1112.52.*protones.*((aceite.*peroxido)-(1./k2).*epox)) ;
% dYdX = (k1.*protones.*((aceite.*peroxido)-(1./0.674046).*epox)) ;

% Assign particular ODE left hand side to the generic dYdX (vector column)

% dYdX = ;

end
```

dif_Y_opt_ODEs_24_25

```
% (C) 2016 Salvador C. Cardona

function dif_Y = dif_Y_opt_ODEs_24_25(b,Xexp,Yexp,Y0,param)

% Automatically extract parameters from param structure

nombres_variables = fieldnames(param);
longitud_param = length(nombres_variables);
for i = 1:longitud_param
    eval([nombres_variables{i}, '=param.',nombres_variables{i},';']);
end

% Define the generic integration interval Xspan

Xspan = Xexp;

% Identify the ODE system

odefun = @(X,Y) ODEs_opt_24_25(X,Y,b,param);

% Solve the ODE system and assign the results to the particular dependent
% variables. By default MaxStep=(Xspan(end)-Xspan(0))/10.

options = odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-8,'Refine',[],'MaxStep',[]);
[Xsim,Ysim] = ode15s(odefun,Xspan,Y0,options);

% Define the differences between experimental and theoretical data.

dif_Y = Ysim-Yexp;

end
```

main_opt_ODEs_24_25

```

% (C) 2016 Salvador C. Cardona

clc
clear all
close all

%% DATA READ AND ACQUISITION

% Read data file and automatically create param structure.

Datos_Globales

variables_workspace = whos;
num_variables = length(variables_workspace);
for i = 1:num_variables
    eval(['param.',variables_workspace(i).name,'=',variables_workspace(i).name,'];]);
end

% Experimental data file is loaded and the experimental data are identified

% disp(' ');
file_name = xlsread("cinetica_interpolados.xlsx");%input(' File with experimental data: ');
exp_data = file_name;

Xexp = exp_data(:,1);
Yexp = exp_data(:,2);

%% ODE SYSTEM SOLVING WITH INITIAL FITTING PARAMETER VALUES

% Initial conditions for ODE system. Assign the particular initial
% conditions to the generic initial conditions Y0

Y0 = 0.218189;

% Define the generic integration interval Xspan=[Xmin Xmax].
% Other option is Xspan=[Xmin X1 X2 ... Xmax]

Xspan = [0 Xexp(end)];

% Initial estimates for fitting parameters "b"

b_ini = [1110 18.4 ];

% Identify the ODE system

odefun = @(X,Y) ODEs_opt_24_25(X,Y,b_ini,param);

% Solve the ODE system and assign the results to the particular dependent
% variables. By default MaxStep=(Xspan(end)-Xspan(0))/10.

options = odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-8,'Refine',10,'MaxStep',[]);
[Xsim,Ysim] = ode15s(odefun,Xspan,Y0,options);

Tiempo = Xsim;
Oxigeno = Ysim(:,i);

%% PLOT EXPERIMENTAL DATA AND SIMULATED DATA WITH b_ini

figure()

subplot(1,2,1)
plot(Xexp,Yexp,'o',Tiempo, Oxigeno)
xlabel(' ');
ylabel(' ');
legend(' ','Location','Best');

```

```

disp(' ');
agree = input(' Do you agree with initial parameters b_ini (Y,N)? ','s');

b_ini_text = '';

while agree == 'N'

    disp(' ')
    disp([' ',b_ini_text,' = ',mat2str(b_ini)])
    b_ini = input([' New parameters ',b_ini_text,' = ']);

    odefun = @(X,Y) ODEs_opt_24_25(X,Y,b_ini,param);

    [Xsim,Ysim] = ode15s(odefun,Xspan,Y0,options);

Tiempo = Xsim;
Oxigeno = Ysim(:,i);

    figure()

    subplot(1,2,1)
    plot(Xexp,Yexp,'o',Tiempo, Oxigeno)
    xlabel(' ');
    ylabel(' ');
    legend(' ','Location','Best');

    disp(' ');
    agree = input(' Do you agree with initial parameters b_ini (Y,N)? ','s');

end

```

%% OPTIMIZATION PROCEDURE

```

% Assign initial estimates for fitting parameters "b"
b0 = b_ini;

% Lower bound for fitting parameters "b"

disp(' ');
b_low = input(' Lower bound for fitting parameters: ');

% Upper bound for fitting parameters "b"

disp(' ');
b_up = input(' Upper bound for fitting parameters: ');

% Objective function to be minimised

objective_function = @(b) dif_Y_opt_ODEs_24_25(b,Xexp,Yexp,Y0,param);

% Fitting parameters determination with lsqnonlin function

options = optimoptions('lsqnonlin','Algorithm','trust-region-reflective'); % levenberg-marquardt trust-r
options = optimoptions(options,'FunctionTolerance',1e-16);
options = optimoptions(options,'StepTolerance',1e-16);
options = optimoptions(options,'MaxIterations',2000);
options = optimoptions(options,'MaxFunctionEvaluations',200*size(b_ini,2));
options = optimoptions(options,'FiniteDifferenceStepSize',eps);
options = optimoptions(options,'FiniteDifferenceType','central'); % forward central
options = optimoptions(options,'OptimalityTolerance',eps);
options = optimoptions(options,'Display','iter');

[b,resnorm,residual,exitflag,output,lambda,Jacobian] = lsqnonlin(objective_function,b0,b_low,b_up,options);

% Confidence intervals determination with nlparci function

```

9.Anexos

```
CI = nlparci(b,residual,'jacobian',Jacobian);

disp(' ');
disp(' ++++++');
disp('      Resultados del ajuste con LSQNONLIN')
disp(' ++++++');
disp(' - Criterio de parada: ')
switch exitflag
case 1
    disp(' La función converge en la solución b. ')
case 2
    disp(' El paso en b fue menor que la tolerancia especificada. ')
case 3
    disp(' El paso en los residuos fue menor que la tolerancia especificada. ')
case 4
    disp(' La magnitud de la dirección de búsqueda fue menor que la tolerancia especificada. ')
case 0
    disp(' El número de iteraciones excede de las opciones definidas. MaxIter o número de evaluaciones de la función excede las opciones. FunEvals. ')
case -1
    disp(' La función de salida ha finalizado el algoritmo. ')
case -2
    disp(' El problema es inviable: los límites lb y bu son inconsistentes. ')
case -3
    disp(' La regularización de los parámetros alcanza valores demasiado grandes (Algoritmo Levenberg-Marquardt). ')
case -4
    disp(' La línea de búsqueda no es suficiente para reducir los residuos a lo largo del presente ajuste.')
end

disp(' - Opciones del algoritmo:')
disp(output)
disp(' * Para leer el mensaje: output.message')
disp(' ++++++')
fprintf('%15s\t %15s\t %15s\t %15s\n','Parámetro','Valor','LCI (95%)','LCS(95%)')

for i=1:length(b)
    fprintf('          b(%g)\t %15g\t %15g\t %15g\n',i,b(i),CI(i,1),CI(i,2));
end
disp(' ++++++')

disp(' ')
disp([' resnorm = ',num2str(resnorm)])
disp(' ')


```

%% ODE SYSTEM SOLVING WITH FINAL FITTING PARAMETER VALUES

% Identify the ODE system

```
odefun = @(X,Y) ODEs_opt_24_25(X,Y,b,param);
```

% Solve the ODE system and assign the results to the particular dependent variables. By default MaxStep=(Xspan(end)-Xspan(0))/10.

```
options = odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-8,'Refine',10,'MaxStep',[]);
[Xopt,Yopt] = ode15s(odefun,Xspan,Y0,options);
```

```
Tiempoop = Xopt;
```

```
Oxigenoop = Yopt(:,1);
```

%% PLOT EXPERIMENTAL DATA AND SIMULATED DATA WITH b

```
subplot(1,2,2)
plot(Xexp,Yexp,'o',Tiempoop, Oxigenoop)
xlabel(' ');
ylabel(' ');
legend(' ','Location','Best');
```

```
Datos_Origin_Sim = [Xsim Ysim];
```

9.3 Planos

Diagrama de flujo del
proceso de producción de
una baldosa a partir de aceite
de cáñamo epoxidado

Edición 1

05/06/2025

