



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESPUMA AISLANTE A PARTIR DE ASTILLAS DE QUILLAJA SAPONARIA

Por

Agustín José Casas del Valle Albornoz

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico

Profesor Guía

Miguel Pereira

Profesor Comisión

Alejandro Karelovic

abril 2026

Concepción, Chile

© 2026, Agustín José Casas del Valle Albornoz

© 2026, Agustín José Casas del Valle Albornoz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis profesores que me enseñaron y guiaron durante este largo proceso, entre ellos Alejandro Karelovic, Miguel Pereira, Fernando Márquez y Andrés Mejía, entre otros. A mis amigos que me acompañaron en el proceso y fueron pilares en esta carrera universitaria, me ayudaron a crecer tanto personal como académicamente, brindándome también espacios de distensión durante este proceso. A Héctor Fierro, gran artífice de esta memoria. A mi madre que me apoyó en cada momento difícil, con alegría y voluntad perpetua. A Paz Rodríguez, por estar de manera incondicional y darme las energías necesarias. A Pedro Robles, quien me enseñó y me acompañó desde mi etapa escolar hasta la etapa final de mi carrera universitaria.

Resumen

Se desarrolla la producción y caracterización de espumas aislantes a partir de *Quillaja saponaria*, agregando 2 tipos de fibra bi-componente (PLA/PLA y PLA/PBS) como agente de unión térmica, funcionando como adhesivo a través de la fundición de la vaina de PLA (ácido poliláctico) o PBS (succinato de polibutano), según sea el caso. Se describe el proceso de preparación de pulpa *fluff* de quillay mediante diversas técnicas de refinado húmedo y seco. Se clasifica la pulpa *fluff* mediante tamices de distintos tamaños, comparando distintos rangos. Para realizar *fluffing* (esponjar) se evalúan dos estrategias de mezclado: cardado manual e inyección de aire en suspensión, se determina la cantidad apropiada de bi-componente en función de la capacidad aislante y propiedades mecánicas. Se evalúan sus propiedades térmicas, para lo cual, se implementa un modelo transitorio unidimensional basado en la ecuación de conducción de calor, el cual se resuelve mediante series de Fourier con bases ortogonales, con el fin de estimar preliminarmente las propiedades térmicas del material, mediante un ensayo experimental. De este ensayo de medición de propiedades térmicas se obtienen valores de $\alpha = 1,664 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $k = 0,0159 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $R = 21,4039 \text{ K/W}$ (para un área=0,09m²), lo que sitúa al material dentro del rango de aislantes de alta eficiencia. Al analizar económicamente la viabilidad del proyecto evaluando OPEX, CAPEX, PAYBACK, TIR y VAN, da resultados prometedores, obteniendo un VAN = 1.188.683 \$ USD y un TIR= 31,68 %.

Estos resultados entregan un buen indicio de que se puede transformar un residuo forestal de fibra corta en un aislante térmico liviano, reproducible y competitivo, demostrando su potencial como material aislante térmico sostenible frente a alternativas convencionales, tanto en lo económico como en propiedades térmicas y estructurales, estableciendo una base sólida para su futura optimización, escalamiento y estandarización, con miras a su comercialización bajo normas ISO o ASTM.

palabras clave – aislante, bicomponente, *fluff*.

Abstract

This study presents the development and characterization of insulating foams produced from *Quillaja saponaria*, incorporating two types of bicomponent fibers (PLA/PLA and PLA/PBS) as thermal bonding agents. These fibers act as thermal bonding agents through the melting of the PLA (polylactic acid) or PBS (polybutylene succinate) sheath, depending on the fiber type used.

The preparation process of quillay fluff pulp is described using different wet and dry refining techniques. The fluff pulp was classified using sieves of different mesh sizes to compare various particle size ranges. To perform the fluffing process, two mixing strategies were evaluated: manual carding and air injection under suspension conditions. The appropriate amount of bicomponent fiber was determined according to the thermal insulation performance and mechanical properties of the resulting material.

The thermal properties of the foam were evaluated through a one-dimensional transient heat conduction model solved using Fourier series with orthogonal bases. Due to the absence of ASTM-standard thermal conductivity equipment, this methodology was implemented to preliminarily estimate the thermal properties of the material from experimental measurements.

The thermal characterization yielded average values of $\alpha = 1,664 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $k = 0,0159 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $R = 21,4039 \text{ K/W}$ (for an area of $0,09 \text{ m}^2$), placing the material within the range of high-efficiency thermal insulators. An economic feasibility assessment of the project, considering OPEX, CAPEX, Payback Period, IRR, and NPV, yielded promising results, with an NPV of USD 1,188,683 \$ USD and an IRR of 31.68 %.

These results provide encouraging evidence that a short-fiber forestry residue can be transformed into a thermal insulation material into a lightweight, reproducible, and competitive thermal insulation material, demonstrating its potential as a sustainable alternative to conventional insulation materials in terms of economic performance as well as thermal and structural properties, establishing a solid basis for future optimization, scale-up, and standardization under ISO or ASTM regulations.

Keywords – insulating, bicomponent, *fluff*.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	1
Resumen	2
Abstract	3
1. Introducción	1
1.1. Normas	3
1.1.1. Resistencia térmica	4
1.1.2. Conductividad térmica	4
1.1.3. Resistencia al fuego	5
2. Objetivos	6
2.1. Objetivo general	6
2.2. Objetivos específicos	6
3. Metodología	7
3.1. Materiales	7
3.1.1. Materias primas	7
3.1.2. Equipos utilizados	8
3.2. Procedimiento experimental	9
3.3. Diseño experimental	10
3.3.1. Factores y niveles	10
3.4. Determinación de conductividad, resistencia y difusividad térmica	11
3.4.1. Condiciones de contorno e inicial	12
3.4.2. Adimensionalización	13
3.4.3. Cantidad de términos de Fourier	14
3.4.4. Montaje experimental térmico	15
3.4.4.1. Procedimiento de medición	16
3.5. Análisis económico	17
4. Resultados y discusión	20
4.1. Resultados de la preparación del <i>fluff</i>	20
4.1.1. Mezclado por cardado	20
4.1.1.1. Efecto del tamaño y tipo de fibra bicomponente	21
4.1.2. Proporción <i>fluff</i> y PLA/PBS	21

4.2. Incorporación de fibra bicomponente y formación del manto	24
4.3. Resultados de termofijación	26
4.4. Ensayos preliminares de caracterización térmica (modelo MATLAB)	27
4.5. Propiedades térmicas experimentales	28
4.5.1. Estimación de la capacidad calorífica efectiva	28
4.5.2. Ensayo de propiedades térmicas 1	29
4.5.3. Ensayo de propiedades térmicas 2	30
4.5.4. Ensayo de propiedades térmicas 3	31
4.6. Propagación ignífuga	33
4.7. Blancura	34
4.8. Resultados mecánicos	36
4.9. Hinchamiento de la espuma	38
4.10. Análisis técnico y económico	38
4.10.1. Análisis económico preliminar	39
4.11. Resultados de caracterización	42
5. Conclusión	44
Referencias	46
Apéndices	49
A. Anexos	49
A1. Representación 3D	49
A2. Colorímetro	50
A3. Termocupla	51
A4. Refinador de discos	51
A5. Sistema cerrado de inyección de aire	52
A6. Compresor	53
A7. Balanza digital	54
A8. Horno convectivo	55
A9. molde pequeño	56
A10. Impregnación de bórax anhidro	57
A11. Tamices	58
A12. Fluff de pino	58
A13. Clasificación	59
A14. Peines cardadores	60
A15. Metodos de mezclado	61
A16. prototipos formados con PLA/PBS	62
A17. Espumas formadas de PLA/PLA	62
A18. Validación del modelo matemático	62
A19. Flujo de caja	64
A19.1. Supuestos económicos generales	64
A19.2. Estimación del CAPEX	65
A20. Estimación del OPEX	65
A20.1. Materias primas	65

A20.2. Consumo eléctrico	66
A20.3. Producción considerada	66
A20.4. Supuestos económicos generales	67
A20.5. Consumo eléctrico	68
A20.6. Indicadores económicos	68
A20.7. Comparación económica preliminar con aislantes comerciales	69
A21. Ampliación del cálculo del modelo matemático	70
A22. Modelo matemático en 3D	75
A23. Resumen general	78

Índice de tablas

3.1. Proporciones de pulpa mecánica de Quillay y pulpa bicomponente utilizadas en las muestras experimentales.	9
3.2. Factores y niveles considerados en el diseño experimental.	10
3.3. Matriz de diseño para tratamientos.	11
3.4. Protocolo de ensayo para la medición de propiedades térmicas.	16
4.1. Resultados de peso, volumen y densidad para distintos métodos de cardado con 13 % de PLS/PBS.	21
4.2. Resultados de una pasada en el refinador por disco rompedor y luego clasificados.	22
4.3. Distribución de masa por fracción de tamiz en la primera pasada por el refinador.	23
4.4. proporciones de composición de PLA/PBS y fluff de Quillay.	25
4.5. Densidad aparente de espumas Quillaja-PLA/PBS para distintas proporciones de fibra bicomponente.	25
4.6. Resultados de blancura de la espuma sin polvo celulósico.	34
4.7. Resultados de blancura de la espuma con polvo celulósico.	35
4.8. Parametros utilizados.	42
4.9. Resumen consolidado de propiedades del material aislante desarrollado.	43
A19.1 Parámetros económicos utilizados en la evaluación del proyecto.	64
A19.2 Estimación de inversión inicial (CAPEX).	65
A20.1 Estimación de costos operacionales anuales iniciales (OPEX).	66
A20.2 Producción anual considerada en el flujo de caja.	67
A20.3 Parámetros económicos utilizados en la evaluación del proyecto.	67
A20.4 Estimación de costos operacionales anuales iniciales (OPEX).	68
A20.5 Indicadores económicos obtenidos para el proyecto propuesto.	69
A20.6 Comparación preliminar entre aislantes térmicos comerciales y la espuma desarrollada a partir de Quillay.	70
A23.1 Resumen de caracterización experimental del prototipo final de espuma aislante.	78

Índice de figuras

4.1. Colocación de termocupas.	27
4.2. Comparación de resultados experimentales con modelo matemático 1.	29
4.3. Comparación de resultados experimentales con modelo matemático 2.	30
4.4. Comparación de resultados experimentales con modelo matemático 3.	31
4.5. Medición de propiedades térmicas.	32
4.6. Gráfico representativo del esfuerzo requerido.	37
4.7. Promedio de cada muestra con 3 repeticiones cada una.	37
A1.1.Orientación de espuma en amarillo y placas en gris.	49
A2.1.colorimetro spectromether	50
A3.1.Termocupla tipo K	51
A4.1.Refinator utilizado para realizar pulpa y fluff	51
A5.1.sistema utilizado para mezclar PLA/PBS con fluff	52
A6.1.Compresor que inyecta aire a 6 bar de presión	53
A7.1.Balanza	54
A8.1.Horno a convección para termo-fijación a 170°C	55
A9.1.Molde realizado para hacer muestras de área 10x10	56
A10.1.muestra sin bórax y con bórax	57
A10.2.esquema sin bórax y con bórax	57
A11.1.Tamices de distinto diámetro	58
A12.1.Fluffing realizado con pulpa de pino industrial	58
A13.1.Fracciones de pulpa mecánica obtenidas mediante tamizado (muestras 1 a 4 de izquierda a derecha).	59
A14.1.Peines para cardado manual.	60
A15.1.Manto formado mediante técnica de inyección de aire.	61
A15.2.Manto formado mediante técnica de cardado manual.	61
A16.1.Primeras espumas formadas con el bicomponente PLA/PBS.	62
A17.1.Primeras espumas formadas con bicomponente PLA/PLA.	62
A18.1.Comparación entre datos sintéticos y predicción del modelo transitorio ajustado.	63
A22.1.Mapa de calor a distintas posiciones en el espesor.	75
A22.2.Gráfica 3D respecto al modelo matemático planteado.	76

Capítulo 1

Introducción

En el contexto actual del desarrollo de materiales sostenibles y renovables, se ha incrementado el interés por utilizar materiales orgánicos para la producción de aislantes térmicos de bajo impacto ambiental. Estos materiales buscan reemplazar soluciones convencionales derivadas del petróleo, ayudando a reducir la huella de carbono y aprovechar la disponibilidad de recursos renovables. En la industria de aislantes se tienen espumas de poliuretano (PUR), poliestireno expandido (EPS) también conocido como plumavit, poliestireno extruido (XPS), poliisocianurato (PIR), entre muchos otros. Todos los materiales mencionados presentan propiedades térmicas que cumplen las normas ISO o ASTM, pero con una alta huella de carbono, debido a su baja biodegradabilidad, emisiones asociadas a su proceso de fabricación y la complejidad o imposibilidad de reciclaje. Estos materiales generan impactos sobre el medio ambiente, asociados al uso de materiales no renovables y el consumo de energía fósil en su elaboración (Asdrubali et al., 2015). Con estos antecedentes, se buscan cada vez más alternativas renovables basadas en fibras naturales y residuos lignocelulósicos, que se han propuesto para reducir impactos ambientales (Abu-Jdayil et al., 2019). Sin embargo, no se ha profundizado el estudio sobre espumas aislantes de lignocelulosa de fibra corta.

El objetivo de este trabajo es desarrollar y caracterizar una espuma aislante a partir de astillas provenientes de desechos residuales de la extracción de saponinas de la *Quillaja saponaria*, evaluando el efecto de la incorporación de fibras bicomponentes como agente de unión térmica, así como su desempeño térmico mediante un modelo de conducción de calor transitorio.

El quillay (*Quillaja saponaria*) es una especie nativa de Chile ampliamente utilizada para la extracción de saponinas. Las saponinas extraídas tienen un amplio rango de aplicaciones industriales y biotecnológicas. Históricamente se han utilizado como detergentes y actualmente, se emplean como aditivos alimenticios y en productos cosméticos. Además, se han estudiado

por sus actividades farmacológicas (antivirales, antibacterianas y antifúngicas), lo que refleja su versatilidad y su creciente demanda para diversas aplicaciones (Fleck et al., 2019). Esta extracción genera residuos de biomasa (corteza, astillas y finos) que representan un subproducto forestal de gran volumen, el cual puede revalorizarse aprovechando su naturaleza lignocelulósica (Fleck et al., 2019).

Las espumas lignocelulósicas se caracterizan por presentar una baja densidad, alta porosidad, regulación de la humedad, propiedades térmicas propicias y resistencia al fuego (mediante aditivos). Procesos como foam-forming, air-laying y dry bonding permiten obtener materiales con una densidad entre 5 y 200 kg/m³ (Xie et al., 2011), lo cual se correlaciona con una alta porosidad debido a su contenido de aire, esto mejora su capacidad de aislación térmica.

En este contexto, se han desarrollado alternativas que no dependen de adhesivos líquidos para la unión de los textiles no tejidos (TNT), según Russell (2007) "Los textiles no tejidos son estructuras en forma de lámina o manto formadas por fibras o filamentos, que se unen mediante procesos mecánicos, térmicos o químicos, sin necesidad de hilar, tejer o formar estructuras textiles convencionales". En este caso se realiza un TNT a través de una pulpa fluff mezclada con un bi-componente mediante termofijación controlada. El fluffing requiere una individualización de las fibras; en procesos industriales, se desfibra mediante molinos de martillos (*hammermills*), donde martillos rotatorios a alta velocidad separan la pulpa en fibras sueltas individuales, que luego se transportan al sistema de formación del velo (Domtar, 2023).

El quillay es un árbol con una dureza alta y de fibras cortas, lo que se asocia con una mayor presencia de polvo celulósico, dificultando la unión térmica entre pulpa *fluff* y PLA/PBS. La incorporación de fibras naturales en espumas o matrices poliméricas puede verse limitada por la tendencia al agrupamiento cuando no se logra una adecuada separación de las fibras y distribución (Malagón Micán et al., 2020). Por lo tanto, se requiere un control en el refinado y una clasificación adecuada.

Por otro lado, el uso de bi-componentes como termofijador es cada vez más común en el estudio de TNT. Diversos estudios han demostrado que el uso de bi-componente permite unir fibras naturales mediante fusión superficial de la vaina. Respecto a los TNT obtenidos por fusión térmica se ha evidenciado que la unión ocurre al fundir la parte termoplástica del filamento, actuando como "adhesivo" termofusible que liga las fibras entre sí, sin necesidad de adhesivos líquidos (Srisuk et al., 2024). En particular, investigaciones con fibras bi-componentes de PLA/PBS (PBS=succinato de polibutileno) para fabricación de TNT muestran que, bajo condiciones adecuadas de temperatura, presión y tiempo de contacto, se logra una red cohesionada con propiedades mecánicas aceptables (Patcharee Pratumpong et al., 2023). Además, la parte termoplástica del bicomponente PLA/PLA (PLA en la vaina) funde en un rango de aproximadamente 160–180°C y en el caso de PLA/PBS,

el PBS comienza a fundir a los 115°C. Por tanto, basados en la evidencia bibliográfica, resulta plausible que condiciones del orden de 170°C durante 10 minutos permitan una fusión superficial suficiente de la vaina de PBS sin degradación significativa del core (PLA), generando una unión efectiva con el *fluff* de Quillay.

El uso de bórax y ácido bórico es un estándar en materiales de celulosa aislante (Hurtado et al., 2015). Sin embargo, su interacción con procesos de termofijación seca requiere control, ya que puede afectar la energía superficial y la adhesión de la vaina fundida. Es por esto que resulta más práctico aplicar borax anhidro diluido en agua sobre la espuma aislante posterior a la termofijación, con esto se evita disminuir la cohesión.

No existen investigaciones sobre el uso de residuos de *Quillaja saponaria* en la fabricación de espumas aislantes mediante procesos de termofijación sin adhesivos. Se plantea que la incorporación de fibras bicomponente PLA/PBS en una matriz lignocelulósica de quillay permite obtener un material aislante con propiedades térmicas competitivas mediante un proceso de termofijación controlada. Luego de una extensa revisión bibliográfica, no se encuentra ninguna otra investigación donde se logre fabricar espumas aislantes con una base lignocelulósica de fibra corta, sin agregar fibras largas de otra madera.

1.1. Normas

El aislamiento térmico es un factor clave en cuanto a la eficiencia energética en el área de la construcción y procesos industriales, ya que permite reducir las pérdidas de calor y, por ende, la demanda energética de climatización. En términos generales, los materiales aislantes se pueden agrupar en tres grandes categorías: orgánicos, inorgánicos y compuestos; en este caso se habla de un compuesto, ya que se utilizan productos orgánicos e inorgánicos en su elaboración. Cada grupo presenta rangos característicos para las propiedades térmicas, por lo que el aislante debe responder a normas térmicas, de seguridad y durabilidad.

La caracterización de las propiedades térmicas se realiza siguiendo normas internacionales que estandarizan los métodos de ensayo y los parámetros a reportar. Entre ellas destacan las normas ASTM y las normas ISO, que definen procedimientos para la medición de la conductividad térmica y de la resistencia térmica en régimen estacionario. En particular, la norma ASTM C518-15 establece el método del medidor de flujo de calor (heat flow meter apparatus) para determinar las propiedades térmicas de ensayos planos (ASTM International, 2015), mientras que las normas ISO 8301 e ISO 8302 describen, respectivamente, los métodos de medidor de flujo de calor y de placa caliente acondicionada para materiales aislantes (International Organization for Standardization, 1991a,b).

En este informe no se aplican directamente estos métodos estacionarios, pero se utilizan como referencia para definir el procedimiento experimental, las magnitudes reportadas (k , α , R) y para comparar los resultados mediante el método transitorio propuesto.

1.1.1. Resistencia térmica

La resistencia térmica R es una magnitud que representa la oposición de un material al flujo de calor a través de este. Suponiendo un material de espesor B y conductividad térmica efectiva k , la diferencia de temperatura como ΔT , la relación entre el flujo de calor q'' y R viene dada por:

$$R = \frac{B}{k}, \quad q'' = \frac{\Delta T}{R}, \quad q'' = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (1.1)$$

Los ensayos estandarizados consisten en ubicar la muestra entre dos placas a distinta temperatura y registrar el flujo de calor en condiciones estacionarias, de acuerdo con ASTM C518-15 o ISO 8301 (ASTM International, 2015; International Organization for Standardization, 1991a). A partir de la medida de q'' , ΔT y del espesor B se obtiene el valor de R , que se utiliza como parámetro comparativo del desempeño aislante.

1.1.2. Conductividad térmica

La conductividad térmica k es una propiedad que cuantifica la capacidad de un material para transferir calor de una zona más caliente a una más fría, midiendo la rapidez con la que el calor se transfiere a través del material. En los métodos estandarizados se mide en estado estacionario, la muestra a trabajar se ubica entre una placa caliente y una placa fría, manteniendo una diferencia de temperatura conocida. El flujo de calor a través del material se mide mediante transductores de flujo de calor (método de medidor de flujo) o a partir del balance de energía en una placa caliente acondicionada (ASTM International, 2015; International Organization for Standardization, 1991a,b). La conductividad térmica se calcula como:

$$k = \frac{q'' B}{\Delta T} \quad (1.2)$$

Donde B es el espesor de la espuma y ΔT la diferencia de temperatura entre las superficies opuestas. En la espuma aislante estudiada, este parámetro es crítico para comparar su desempeño con el de materiales comerciales.

1.1.3. Resistencia al fuego

Además de propiedades térmicas, los aislantes requieren tener una resistencia al fuego alta para evitar incendios o riesgo de propagación; una propagación lenta o nula es necesaria para limitar la expansión en caso de incendio, actuando como un retardante de llama. Las pruebas normalizadas por ISO o ASTM de reacción al fuego exponen las probetas a una fuente de calor o de llama estandarizada y cuantifican parámetros como la propagación de la llama, la generación de humo y la tasa de liberación de calor. En función de los resultados, el material se clasifica dentro de una determinada categoría de comportamiento al fuego, lo que condiciona su uso en elementos constructivos de envolvente y en aplicaciones industriales. Para la espuma que se desarrolla en esta memoria, el cumplimiento de los criterios mínimos de resistencia al fuego es esencial para su potencial aplicación en edificios y sistemas de aislamiento térmico.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo general

Obtener y caracterizar espumas aislantes de baja densidad a partir de astillas residuales de *Quillaja saponaria* mediante procesos mecánicos y termofijación controlada.

2.2. Objetivos específicos

1. Implementar un proceso y dosificación de fibra bi-componente en la mezcla con fibras de Quillay para la obtención de una espuma estructuralmente resistente al manejo y transporte.
2. Determinar las propiedades físicas, estructurales y características de la espuma obtenida para la creación de una ficha de producto.
3. Analizar la cantidad necesaria para la implementación de sales de bórax y cómo cambia su ignición

Capítulo 3

Metodología

3.1. Materiales

En esta sección se describen los materiales utilizados para la fabricación, la preparación y la caracterización preliminar de las espumas aislantes basadas en Quillay y en PLA/PBS. Todos los materiales fueron seleccionados considerando su disponibilidad y su compatibilidad con procesos de termofijación para obtener un material aislante de muy baja densidad.

3.1.1. Materias primas

- **Astillas de *Quillaja saponaria***: Provenientes de residuos industriales del proceso de extracción de saponinas. Se seleccionaron astillas gruesas (longitud mayor a 3 mm) debido a su mayor contenido de fibra útil, descartando fracciones finas para evitar exceso de polvo en el proceso de refinado.
- **Fibra bi-componente PLA/PBS (4 mm)**: Es un material textil termoplástico conformado por un núcleo (*core*) de PLA y una vaina (*sheath*) de PBS. De acuerdo con la ficha técnica de *Mitsubishi Chemical Corporation* (s.f.), el polímero PBS presenta un punto de fusión de 115 °C (Mitsubishi Chemical Corporation, nd). Por su parte, NatureWorks LLC (s.f.) indica que el PLA de grado fibra posee un punto de fusión de aproximadamente 170 °C (NatureWorks LLC, nd). Esta diferencia de temperaturas permite la termounión selectiva de la vaina sin comprometer la estructura del núcleo, lo cual es un aspecto clave para la fabricación de materiales compuestos biodegradables tipo *core-sheath*. Utilizada como agente aglutinante para la cohesión interna del panel. Su longitud reducida (4 mm) favorece el entrelazamiento con la fibra corta de Quillay.
- **Bórax anhidro ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, tetraborato de di-sodio anhidro, grado analítico)**: Es

un compuesto utilizado como aditivo ignífugo en concentraciones entre 15 a 20 % en masa para aislantes celulósico (Hurtado et al., 2015). Aplicado en solución acuosa atomizada.

3.1.2. Equipos utilizados

- **Refinador con discos rompedores y discos refinadores:** Es una máquina industrial clave en la fabricación de papel y pulpa, que usa dos discos giratorios y opuestos para desgastar y desfibrar tejido vegetal como la madera mediante fricción. Empleado para la obtención de pulpa mecánica y posterior *fluffing* en seco. Permite el desfibrado inicial y la mejora de la individualización de fibras como lo muestra la figura A4.1.
- **Horno de convección forzada:** Capaz de operar entre 0 y 200°C. Utilizado para el proceso de termofijación del bicomponente mediante calentamiento volumétrico controlado, como lo muestra la figura A8.1.
- **Sistema de inyección de aire a presión:** Compuesto por un compresor portátil y un contenedor hermético con malla superior. Permite la mezcla homogénea de *fluff* con fibra bicomponente mediante suspensión turbulenta de fibras, como lo muestra la figura A5.1.
- **Tamices metálicos:** (1,00 mm, 0,84 mm, 0,42 mm y 0,28 mm) Columnas de tamizado normalizado para la clasificación granulométrica de la pulpa y separación de fracciones según tamaño de fibra, como se muestra en la figura A11.1.
- **Moldes para formación de paneles** (10 × 10 cm): Utilizados para depositar la mezcla homogeneizada antes del proceso de termofijación. Fabricados en el laboratorio para el desarrollo de los ensayos descritos, como lo muestra la figura A9.1.
- **Balanza analítica** (± 0.01 g): Para el pesaje preciso de las muestras de pulpa, bicomponente y aditivos, se puede visualizar en la figura A7.1.
- **Higrómetro y termómetro digital:** Permiten controlar la humedad relativa y temperatura ambiente durante el secado controlado de la pulpa en sala de climatización.
- **Compresor:** Permite inyectar el aire al sistema cerrado a presiones entre 1 y 6 bar máximo, ejerciendo la presión necesaria para remover y mezclar el *fluff* y el bicomponente PLA/PBS, como se ve en la figura A6.1.
- **Termocuplas tipo K:** Consideradas para la estimación de perfiles térmicos durante los ensayos experimentales del modelo transitorio, como lo muestra la figura A3.1.

3.2. Procedimiento experimental

En esta sección se describe el paso a paso para realizar espumas aislantes de $10 \times 10 \text{ cm}$ para medir propiedades mecánicas, aspectos cualitativos y cuantitativos, que permiten discernir entre un método de procedimiento y otro.

1) Con el objetivo de mejorar la obtención de pulpa, se saturan en agua las astillas de *Quillaja saponaria* con un tamaño superior a 3 mm , las de diámetro inferior se descartan. 2) Antes de pasar por el refinador, se sumerge en agua caliente para acondicionar la pulpa a 80°C , por al menos 1 hora antes de refinar, mejorando la calidad de la pulpa. 3) Se ingresan las astillas por el refinador con discos rompedores una vez y abundante agua caliente. 4) Se deja secar la pulpa de 24 a 48 horas en una sala climatizada a 25°C y humedad del 50 %. 5) La pulpa seca se vuelve a procesar en el refinador una vez, individualizando las fibras para obtener una pulpa *fluff*. Sin embargo, al ser astillas con naturaleza de fibra corta, se obtiene cerca de un 25 % de polvo celulósico, como muestra la tabla 4.3, el cual es descartado junto con la biomasa de mayor tamaño que 1 mm , debido a que sus fibras no alcanzaron a individualizarse. 6) Se selecciona el *fluff* con una serie de tamices con agujeros de entre 1 mm y $0,28 \text{ mm}$ tal como se describe en la subsección 3.1.2 de equipos utilizados. 7) Este *fluff* se clasifica en distintos tamaños de fibra, mezclando diversos rangos de tamaño con un 10 % de PLA/PBS o PLA/PLA, para definir cuál es el rango más adecuado para la producción de aislantes. 8) Se mezcla la fibra bicomponente con cada muestra de *fluff* en 5 proporciones distintas para consolidar la distribución más adecuada.

Tabla 3.1: Proporciones de pulpa mecánica de Quillay y pulpa bicomponente utilizadas en las muestras experimentales.

Muestra	Pulpa mecánica de quillay [%]	Pulpa bicomponente (PLA/PBS) [%]
1	95 %	5 %
2	90 %	10 %
3	85 %	15 %
4	80 %	20 %
5	75 %	25 %

La forma en que se mezclan la pulpa bicomponente y el *fluff* es a través de un tubo hermético conectado por un orificio a un compresor que inyecta aire a alta presión (6 bar) y una tela en la parte superior que permite que escape el aire, pero no la fibra, como se muestra en el apéndice A5.1. Con esto se mueven las fibras y las mezclan en suspensión obteniendo una mezcla uniforme y con una estructura fibrosa homogénea. El orden es crucial para asegurar un mezclado homogéneo. En primer lugar, debe mezclarse la pulpa bicomponente en el inyector de aire a compresión hasta conseguir que se expanda en su totalidad (1 *min*), posteriormente, se adiciona

la pulpa *fluff* mezclando por 2 minutos. Otra alternativa es usar peines cardadores, donde se debe cardar a mano hasta conseguir una mezcla homogénea (45 *min*). 9) Se deposita la mezcla homogeneizada en un formador o molde con las características deseadas, en este caso un tablero de 10cm $\times$ 10cm. 10) Se termofija la pulpa bicomponente a 170°C y 10 *min* en un horno de convección tal como muestra la figura 4.2. Se trabaja a distintas temperaturas para buscar a qué temperatura funde mejor. Las 5 proporciones se trabajan a la misma temperatura y se varía por cada muestra los porcentajes, con el fin de determinar la proporción ideal. 11) Se prensan algunas muestras con una tapa, consiguiendo una superficie lisa. 12) Se adiciona bórax para bajar la inflamabilidad de las últimas 5 muestras mediante atomización en solución acuosa. La impregnación y el posterior secado permiten que el bórax anhidro esté completamente distribuido por la espuma, donde se evalúa cuál es la menor cantidad para que la espuma no se incendie. Según Hurtado et al. (2015): "Los aditivos utilizados suelen ser una mezcla de bórax y ácido bórico, en una dosis de entre el 15 y el 20 % de la masa de las fibras de celulosa". 13) Se evalúan las características de cada muestra tales como: inflamabilidad, densidad, conductividad térmica, resistencia térmica, resistencia a la tracción, hinchamiento, resistencia a la compresión, etc.

3.3. Diseño experimental

Para describir las condiciones de proceso que permiten obtener la espuma aislante. Para esto se presenta un esquema con factores fijos, en el que se varían de forma sistemática algunas variables de fabricación y se evalúa su efecto sobre las propiedades del material.

3.3.1. Factores y niveles

Tabla 3.2: Factores y niveles considerados en el diseño experimental.

Factor	Símbolo	Niveles
Contenido de fibra bi-componente	X_1	7, 10 y 13 % en masa de PLA/PBS respecto al total de la mezcla bicomponente- <i>fluff</i> de Quillay.
Fracción de tamaño de fibra (tamizado)	X_2	F1: 1,00–0,84 mm; F2: 0,84–0,42 mm; F3: 0,42–0,28 mm; F4: 1,00–0,28 mm.
Técnica de mezclado	X_3	Cardado manual (C) e inyección de aire en suspensión (A).
Condición de termo-fijación	X_4	Horno a 170 °C durante 10 min (condición de referencia), con pruebas exploratorias a ± 10 °C cuando se indica.
Tratamiento ignífugo	X_5	Sin bórax (B0) y con solución de bórax anhidro (B1).

Cada combinación de $(X_1, \dots, X_5)$ define una condición de procesamiento. En la práctica, sólo se fabrican algunas de las combinaciones posibles, de acuerdo con la matriz de diseño mostrada en la Tabla 3.3, priorizando aquellas condiciones factibles a escala de laboratorio y con mayor interés para la caracterización térmica.

Tabla 3.3: Matriz de diseño para tratamientos.

Ensayo	X_1 [%]	X_2	X_3	X_5	Observaciones
R1	7	F2	C	B0	Panel exploratorio, baja cohesión.
R2	10	F2	A	B0	Cohesión intermedia.
R3	13	F4	A	B0	Espuma de referencia para ensayos térmicos.
R4	13	F4	A	B1	Espuma de referencia con tratamiento ignífugo.

3.4. Determinación de conductividad, resistencia y difusividad térmica

En los aislantes térmicos se busca una conductividad térmica baja (que reduzca el flujo de calor) y, en consecuencia, una resistencia térmica alta, donde valores elevados indican una mayor efectividad de aislación (U.S. Department of Energy, nd). Para medir estas propiedades térmicas, es necesario realizar un ensayo experimental aplicando la ley de Fourier con la ecuación de continuidad, representando la espuma como una placa plana bajo el supuesto de conducción unidimensional, esto es válido cuando las dimensiones en el plano (x - y) son significativamente mayores que el espesor (plano (z)), las condiciones térmicas deben variar principalmente en las caras superior e inferior y no en los bordes, además tiene una geometría cuadrada uniforme, con estas consideraciones se puede asumir que las pérdidas laterales son mínimas por ende despreciables, Como señala Incropera et al. (2007, p. 259), “si el espesor de un cuerpo es pequeño en comparación con sus otras dimensiones, los gradientes de temperatura en direcciones distintas a la del espesor pueden despreciarse”. Es por esto que se decide realizar moldes de 30×30 cm y un espesor de 3 cm. Para problemas de placa plana, una relación de aspecto igual o superior a 10 permite modelar la conducción de calor como unidimensional con buena aproximación (Cengel and Ghajar, 2015).

$$\frac{L}{e} = \frac{30}{3} = 10 \quad (3.1)$$

La espuma se ubica entre 2 placas a distintas temperaturas, una caliente a una temperatura constante T_p , por ejemplo 110°C para realizar mediciones preliminares. La cara opuesta se mantiene a una temperatura constante T_a a temperatura ambiente mediante una placa fría. La figura A1.1 describe la orientación de la espuma y las placas en el ensayo experimental.

La transferencia de calor se describe mediante la ecuación de conducción unidimensional.

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < B \quad (3.2)$$

- $T(x, t)$ = temperatura interna de la espuma en grados Celsius.
- t = tiempo en segundos.
- x = posición de termocuplas.
- α = difusividad térmica.

Se expresa la ecuación en función de las temperaturas impuestas en las fronteras (T_a y T_p).

$$T(x, t) = T_a + (T_p - T_a) u(x, t) \quad (3.3)$$

Donde $u(x, t)$ es una función adimensional que describe la evolución del perfil térmico dentro del material. Esta transformación permite homogeneizar las condiciones de contorno y facilitar la resolución mediante variables adimensionales.

Para que este modelo matemático sea factible, se tienen que tomar las siguientes suposiciones:

- Conducción unidimensional a través del espesor.
- Sin generación interna de calor.
- Propiedades termofísicas constantes: α , k , ρ , C_p .
- Se desprecian las pérdidas de calor.
- Condiciones de frontera a temperatura constante.

3.4.1. Condiciones de contorno e inicial

El problema experimental impone temperaturas fijas en ambas placas en contacto con la espuma. Las condiciones de contorno de Dirichlet son comúnmente utilizadas en problemas de conducción de calor con contornos a temperaturas fijas, permitiendo la obtención de soluciones analíticas mediante técnicas como las separaciones de variables (Carslaw and Jaeger, 1959). Las condiciones de contorno se expresan como:

$$\begin{cases} T(0, t) = T_p, \\ T(B, t) = T_a, \end{cases} \quad t > 0 \quad (3.4)$$

Estas condiciones representan superficies mantenidas a temperatura constante. Para este ensayo se dispone de una placa calefactora que mantiene la temperatura en t_p y otra placa fría no calefaccionada que presenta pequeñas variaciones en su temperatura. En la cara caliente, esta condición es justificada por ser una placa calefaccionada eléctricamente, que mantiene una temperatura aproximadamente constante durante el ensayo. En la cara fría a temperatura T_a , se asume una temperatura constante debido a la estabilidad térmica de la placa metálica y a la baja conductividad del material, lo que limita la variación térmica en dicha superficie, ya que el intercambio constante de esta con el medio ambiente mantiene la temperatura cercana a T_a , y la espuma no es capaz de transmitir suficiente calor a la placa fría debido a su baja conductividad térmica.

Al inicio del ensayo, el material se encuentra a una temperatura uniforme igual a la temperatura de la placa fría:

$$T(x, 0) = T_a \quad (3.5)$$

Esta condición inicial es coherente con el procedimiento experimental, donde el sistema parte en equilibrio térmico antes de aplicar el salto de temperatura en la cara caliente.

3.4.2. Adimensionalización

Es habitual introducir variables adimensionales para simplificar la formulación y revelar patrones universales en la solución (Özisik, 1993):

$$\eta = \frac{x}{B}, \quad \tau = \frac{\alpha t}{B^2}, \quad \theta = \frac{T(x, t) - T_a}{T_p - T_a} \quad (3.6)$$

En esta forma, la ecuación de calor queda:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} \quad (3.7)$$

Con condiciones adimensionales:

$$\theta(\eta, 0) = 0, \quad \theta(0, \tau) = 1, \quad \theta(1, \tau) = 0 \quad (3.8)$$

El problema formulado anteriormente se resuelve mediante separación de variables y expansión en serie de Fourier con autovalores semienteros, que emergen justamente debido a las condiciones

de Dirichlet aplicadas en ambas caras. La solución clásica está dada por (Carslaw and Jaeger, 1959):

$$\theta(\eta, \tau) = 1 - \eta - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\pi\eta) \exp(-n^2\pi^2 \tau) \quad (3.9)$$

Esta expresión describe simultáneamente: el perfil instantáneo de temperatura, la tendencia asintótica al estado estacionario, esto permite estimar el cambio de temperatura en cada punto del espesor de la espuma aislante. La implementación en MATLAB utiliza esta solución limitada a un número finito de términos N .

3.4.3. Cantidad de términos de Fourier

En conducción transitoria, los términos de orden alto decaen como:

$$\exp(-n^2\pi^2 \tau) \quad (3.10)$$

Lo que implica una caída extremadamente rápida conforme aumenta N . Esto permite que una serie con 5 a 100 términos entregue una representación precisa del estado transitorio (Carslaw and Jaeger, 1959; Incropera et al., 2007). Se selecciona $N = 100$, lo cual garantiza una convergencia.

$$T(x, t) = T_a + (T_p - T_a) \left[1 - \frac{x}{B} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{B}\right) \exp\left(-n^2\pi^2 \frac{\alpha t}{B^2}\right) \right] \quad (3.11)$$

A partir de la solución adimensional $\theta(\eta, \tau)$, la temperatura dimensional en el interior de la espuma se obtiene como se muestra en la ec.3.11. Esta expresión se evalúa en la posición de cada termocupla y se utiliza para ajustar la difusividad térmica α a partir de los datos experimentales, comparando con distintos valores de α de referencia definiendo una función de error cuadrático y se minimiza respecto a α . Este procedimiento permite obtener:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}, \quad k = \alpha \rho C_p, \quad R'' = \frac{B}{k}, \quad R = \frac{B}{kA} \quad (3.12)$$

R'' corresponde a la resistencia térmica superficial (propiedad intrínseca), mientras que R corresponde a la resistencia total del sistema, dependiente del área de transferencia.

Este método se resuelve a través de series de Fourier por bases ortogonales. La solución matemática amplificada se desarrolla en la sección A21 del Apéndice.

En particular, se consideran los siguientes parámetros térmicos:

- **Conductividad térmica (k):** Se reporta el valor de k multiplicando la difusividad térmica por ρ y C_p y luego promediando las 3 posiciones descritas en 2. Junto con el error que presenta frente al modelo. Se indican la temperatura ambiental en el momento y la humedad relativa (HR) correspondientes, ya que son condiciones que inciden directamente en los resultados del ensayo.
- **Resistencia térmica superficial (R''):** Se calcula el valor de la resistencia térmica superficial mediante la ecuación $R'' = B/k$ ($m^2 K/W$), donde B es el espesor de la espuma. Esta magnitud representa una propiedad intrínseca del material independiente del área de transferencia (Cengel and Ghajar, 2015).
- **Resistencia térmica total (R):** Se determina la resistencia total mediante la formula $R = B/(kA)$ (K/W), donde A es el área de transferencia de calor. Esta resistencia está asociada al sistema experimental y depende de la geometría y área de la muestra (Incropera et al., 2007).
- **Difusividad térmica (α):** La difusividad se obtiene mediante el ajuste del modelo transitorio de conducción de calor, debido a que el problema posee solo un grado de libertad. Además se promedia con el valor que se obtiene de los datos experimentales, calculando así el error del mismo.

$$\alpha \approx \frac{k}{\rho C_p} \quad (3.13)$$

Donde ρ es la densidad de la espuma y C_p es el calor específico a presión constante.

3.4.4. Montaje experimental térmico

1. Área y espesor: Se realizan moldes de 30 cm $\times$ 30 cm $\times$ 10 cm, con una tapa de la misma área para ejercer presión y fijar un espesor según lo requerido. Verificando las dimensiones finales con un pie de metro (tolerancia $\pm 0,5$ mm). Se comprueba que las caras son aproximadamente paralelas para asegurar un espesor uniforme de 3 cm.
2. Instalación de las termocupas en la espuma: Se define el eje z como la dirección del espesor, con $z = 0$ en la placa caliente y $z = B$ en la placa fría. Se fijan las posiciones de las termocupas como el centro del área, es decir, al centro del eje x y del eje y (en $x = L_x/2$, $y = L_y/2$) para favorecer un flujo térmico unidimensional, minimizando las pérdidas de calor por los laterales. Para la medición se define que la termocupla 1 (TC1) va a un 10 % del espesor total B , así, TC2 va a un 50 % del espesor y TC3 a un 90 % del mismo.

- TC1: $z = 3$ mm desde la placa caliente ($z = 0,003$ m).
 - TC2: $z = 15$ mm (al centro del espesor, equidistante de ambas placas).
 - TC3: $z = 27$ mm desde la placa caliente ($z = 0,027$ m).
3. Procedimiento de montaje de las termocupas: Se realizan perforaciones en los puntos indicados de un diámetro similar a las termocupas, para minimizar el aire alrededor del sensor. Para asegurar la posición de las termocupas, se realizan marcas en cada termocupla a 15 cm. Las termocupas se insertan longitudinalmente en el plano de la muestra, con una profundidad de 15 cm respecto al punto de entrada, con el fin de asegurar una correcta posición y estabilidad durante la medición.
4. Protocolo del ensayo:

Tabla 3.4: Protocolo de ensayo para la medición de propiedades térmicas.

Paso	Actividad	Descripción / criterio
1	Acondicionamiento de la muestra	Acondicionar la muestra a T_a hasta alcanzar equilibrio térmico.
2	Estabilización de la placa caliente	Estabilizar la placa caliente hasta alcanzar la temperatura objetivo T_p (lectura estable).
3	Montaje e instrumentación	Ingresa termocupas previo al inicio; montar: muestra sobre placa caliente y placa fría sobre la espuma.
4	Adquisición de datos	Registrar T (TC1-TC2-TC3) cada 20 s hasta alcanzar un régimen casi estacionario.
5	Repetición y validación	Repetir el ensayo ≥ 3 veces y realizar ensayo con espuma de propiedades conocidas para estimar incertidumbre.

3.4.4.1. Procedimiento de medición

El protocolo de medición para los datos experimentales del ensayo en estado transitorio son:

1. Condición inicial: Se busca la condición inicial propuesta, logrando que las temperaturas de la espuma y de las placas sean aproximadamente uniformes y cercanas a la temperatura ambiente ($T \approx T_a$). Se registra un conjunto de datos iniciales $T(x_i, t = 0)$ como condición inicial.
2. Registro de temperatura en función del tiempo:
 - $T_p(t)$: temperatura de la placa caliente.
 - $T_a(t)$: temperatura en la interfaz de la placa fría.

- $T(z_i, t)$: temperaturas en las tres profundidades internas de la espuma (TC1, TC2 y TC3).

Las mediciones se realizan durante un intervalo suficiente de tiempo para observar un cambio significativo de temperatura en todos los espesores de la espuma con una termocupla dentro.

3. Repetición del ensayo: Se repite el procedimiento en al menos 3 ensayos con muestras distintas, con el fin de evaluar la repetibilidad y la reproducibilidad experimental.

3.5. Análisis económico

Para determinar la viabilidad económica de este proyecto, se realiza una estimación de costos asociados a la elaboración de espumas aislantes, considerando que las astillas de *quillaja saponaria* provienen del desecho de las industrias extractoras de saponinas del quillay, lo cual puede rebajar sus costos al ser comprados como un desecho.

El uso de residuos forestales permite disminuir costos asociados a materias primas, particularmente cuando se emplean subproductos de procesos industriales existentes (Fleck et al., 2019).

El costo total de fabricación se estima mediante el costo de inversión inicial CAPEX y el costo operacional OPEX con:

$$C_{\text{inversión}} = C_{\text{equipos}} + C_{\text{instalación}} \quad (3.14)$$

$$C_{\text{operación}} = C_{\text{MP}} + C_{\text{energía}} + C_{\text{MO}} \quad (3.15)$$

donde:

- C_{MP} : Corresponde al costo de materias primas.
- $C_{\text{energía}}$: Representa el consumo energético del proceso.
- C_{MO} : Corresponde a costos estimados de mano de obra.
- $C_{\text{instalación}}$: Corresponde a los costos asociados a la instalación eléctrica y de equipos.

El consumo energético se estima utilizando la potencia de los equipos y el tiempo de operación de estos:

$$C_{\text{energía}} = P \cdot t \cdot \text{tarifa} \quad (3.16)$$

Donde P corresponde a la potencia eléctrica del equipo (kW), t al tiempo de operación (h) y la tarifa corresponde al costo unitario de energía eléctrica.

Con esto se puede calcular el costo de inversión inicial CAPEX y el costo operacional OPEX con:

$$C_{\text{inversión}} = C_{\text{equipos}} + C_{\text{instalación}} \quad (3.17)$$

$$C_{\text{operación}} = C_{\text{MP}} + C_{\text{energía}} + C_{\text{MO}} \quad (3.18)$$

Para comparar económicamente diversos materiales aislantes se debe considerar su desempeño térmico a través de la resistencia superficial R . Este parámetro permite comparar materiales con diferentes espesores y conductividades térmicas bajo un mismo criterio de aislación térmica (Incropera et al., 2007).

Se cotizan los valores de las materias primas utilizadas en la producción de la espuma aislante desarrollada, a pequeña y gran escala. Se evalúan los costos indirectos tales como: mano de obra, depreciación, mantenimiento, pérdidas, transporte y renovación de equipo con el fin de calcular un VAN (valor actual neto) y un TIR (tasa interna de retorno)

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} \quad (3.19)$$

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+\text{TIR})^t} \quad (3.20)$$

Donde:

- I_0 corresponde a la inversión inicial.
- F_t corresponde al flujo neto de caja en el periodo t .
- i corresponde a la tasa de descuento o tasa mínima atractiva de retorno.
- TIR corresponde a la Tasa Interna de Retorno.
- t corresponde al periodo de tiempo evaluado.
- n corresponde al número total de periodos considerados en la evaluación económica.

La evaluación financiera considera un escenario de producción industrial de paneles aislantes, incluyendo costos operacionales, inversión inicial en equipos, una capacidad productiva limitada, una tasa de descuento del 12 %, un horizonte de evaluación del proyecto de 10 años y una proyección de ingresos por venta del producto para evaluar la viabilidad de producir espumas aislantes derivadas de astillas residuales del quillay.

Capítulo 4

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos durante la fabricación de espumas aislantes basadas en *Quillaja saponaria* y fibra bicomponente, la incorporación de bórax anhidro, junto con el análisis térmico preliminar llevado a cabo mediante un modelo transitorio que se implementa en MATLAB, y se comparan con datos experimentales, evaluando su capacidad de hinchamiento, resistencia a la compresión, formación de la espuma, comportamiento ante el fuego, analisis economico y blancura.

4.1. Resultados de la preparación del *fluff*

4.1.1. Mezclado por cardado

La mezcla de cardado manual mediante peines cardadores (A14.1) permite incorporar parcialmente el bicomponente en el *fluff*, pero resulta poco eficiente, como se observa en la figura A15.2, donde se muestran puntos de aglomeración de bicomponente. Este método carece de reproducibilidad al depender de la habilidad del usuario que esté cardando, y de necesitar al menos 45 minutos para incorporar 1,3 gramos de PLA/PBS en 8,7 de *fluff* de Quillay.

Por estos motivos se selecciona la técnica de mezcla por inyección de aire en sistema cerrado mediante un compresor a 6 bar en el sistema que ejemplifica la figura A5.1, con resultados inmediatos, solo 2 minutos para mezclado total, proceso estandarizado limitando el error humano, alcanzando una distribución notablemente homogénea (figura A15.1) del bicomponente y generando una mezcla menos densa como muestra la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resultados de peso, volumen y densidad para distintos métodos de cardado con 13 % de PLS/PBS.

Muestra	Peso (kg)	Volumen (m ³)	Densidad (kg/m ³)
Cardado manual 1	0,00971	0,0001254	77,4322
Cardado manual 2	0,00987	0,0001289	76,5710
Cardado por inyección de aire 1	0,00978	0,0001516	64,5119
Cardado por inyección de aire 2	0,00983	0,0001532	64,1645

Se observa una disminución de la densidad de 17 %, lo que indica una distribución con menos aglomeraciones en la técnica de inyección de aire, siendo un material más poroso y, por ende, con mejores propiedades aislantes, mientras que la técnica de cardado manual es deficiente en la distribución, dejando aglomeraciones, obstruyendo poros y limitando su aislación térmica.

De las imágenes A15.1 y A15.2 se observa una mejora estructural, mejor distribución de fibras, mejora sustancial en la cohesión interna, sin presencia de aglomeraciones ni pérdida de materia lignocelulósica, reflejando una mejor cohesión térmica entre las fibras, dando como decisión utilizar la técnica de inyección de aire a presión para todos los ensayos.

4.1.1.1. Efecto del tamaño y tipo de fibra bicomponente

Se comparan las diferencias de mezclado entre PLA/PLA de 6 mm y PLA/PBS de 4 mm.

Al analizar las fibras de 6 mm (PLA/PLA), se observa una cohesión térmica menor y una mezcla poco homogénea, lo que dificulta el entrelazamiento de las fibras debido a que son mucho más largas que las fibras de Quillay.

Las fibras de 4 mm (PLA/PBS) presentan mayor compatibilidad con el *fluff* de Quillay, lo cual se refleja en una mezcla más esponjosa y uniforme, que consigue una unión térmica total, reflejando una mejor fusión de la vaina de PBS frente a la de PLA. Esta diferencia se evidencia en la figura A17.1 que representa la termofijación de PLA/PLA en contraste de las múltiples espumas fabricadas con PLA/PBS como la figura A15.1

La fusión de la vaina permite la formación de uniones entre fibras, actuando como un agente ligante que mejora la cohesión estructural del material durante procesos de termofijación (Mao and Russell, 2011). Es por esto que se selecciona el PLA/PBS como bicomponente.

4.1.2. Proporción *fluff* y PLA/PBS

Acondicionar las fibras mediante humectación previa al refinado favorece la penetración del agua en las fibras hinchando la pared celular, lo que incrementa su flexibilidad y facilita el proceso de desfibrado, mejorando la calidad de la pulpa (Smook, 2002). Las astillas gruesas,

tras una humectación de 24 a 48 *h* presentan una longitud de fibra mayor evidenciada mediante observación macroscópica, con un rendimiento superior en la etapa de refinado en comparación con la astilla delgada, evidenciado en la menor cantidad de polvo en la pulpa. Por lo que se selecciona únicamente el lote de astillas gruesas.

Se espera un mínimo de 24 horas hasta que la muestra alcance la humedad de equilibrio, la pulpa se clasifica utilizando tamices de 1,00 *mm*, 0,84 *mm*, 0,42 *mm* y 0,28 *mm*, como se muestra en la figura A13.1, obteniendo cuatro fracciones. Las fracciones sobre 0,42 *mm* muestran fibras con una integridad superior al observar macroscopicamente, por esto se utilizan para primeros ensayos fracciones sobre 0,42 *mm* buscando el menor contenido posible de polvo, el cual dificulta la formación de un manto homogéneo y disminuye la eficiencia de la termofijación, debido a que el polvo celulósico rellena los poros, mermando sus propiedades térmicas. Esto indica que la presencia de fino o polvo celulósico es el problema principal.

Las proporciones de este primer ensayo son:

Tabla 4.2: Resultados de una pasada en el refinador por disco rompedor y luego clasificados.

1 pasada D.Rompedor clasificado	peso (g)	peso bolsa (g)	peso final (g)
tamiz 1 (1 <i>mm</i>)	69,52	3,82	65,7
tamiz 2 (0,84 <i>mm</i>)	16,75	3,82	12,93
tamiz 3 (0,42 <i>mm</i>)	22,25	3,82	18,43
tamiz 4 (0,28 <i>mm</i>)	5,32	3,82	1,5
TOTAL			98,56

Como se observa en la Tabla 4.2, la mayor parte de la masa luego del primer refinado húmedo (elaboración de pulpa) se concentra en las fracciones 1 y 2, correspondientes a fibras retenidas sobre los tamices que retienen sobre 1,00 *mm* y entre 1 y 0,84 *mm*, respectivamente. Estas fracciones presentan fibras más largas y menos polvo celulósico, lo que favorece la formación de un manto voluminoso y continuo.

Las fracciones 1 y 2 muestran mejor potencial para fabricación de espuma, por lo que este grupo de muestras se somete a un refinado adicional para individualizar las fibras, pero al contener solo fracciones de mayor tamaño, gran parte se transforma en rechazo, siendo demasiado grande para pasar por el refinador con discos fino, el resultado no es equivalente a un *fluff* industrial, como lo muestra la figura A12.1 debido a la naturaleza intrínsecamente corta de la fibra de Quillay. Por lo que se determina obtener *fluff* sin tamizar, utilizando la pulpa en su totalidad para el refinado y obtención de *fluff*, esto da un resultado positivo, un aspecto más esponjoso y fibras más sueltas (individualizadas). Se realizan espumas obteniendo un aspecto morfológico homogéneo y con una mejor cohesión entre la vaina termofundida de PLA/PBS y *fluff*, sin embargo, presentan una alta

densidad ($\rho = 78 \text{ kg/m}^3$) en referencia a espumas aislantes de alta eficiencia, esto indica que los poros se rellenaron de polvo lignocelulósico, aumentando su peso y disminuyendo su porosidad, por otra parte, la cohesión de fibras fue deficiente, esto se evidencia en que la espuma pierde material en forma de microfibras al manipularse, lo que también se debe a la presencia polvo.

Para mejorar la calidad del *fluff* se acondicionan las astillas con agua caliente por 30 minutos antes del primer refinado. Aumentar la temperatura de las astillas previo al refinado favorece el ablandamiento de la lignina presente en la pared celular, lo cual mejora la separación de fibras, por consecuencia, aumenta la individualización de las fibras (Sixta, 2006). Posterior a obtener la pulpa, se reposa en el laboratorio hasta que se alcance la humedad de equilibrio, se introduce la pulpa en el refinador usando discos refinadores para individualizar al máximo las fibras, se tamiza con los mismos rangos de clasificación.

- Muestra 1: Rango de tamaño entre 0,42 y 0,84 *mm*.
- Muestra 2: Rango de tamaño entre 0,84 y 1 *mm*.
- Muestra 3: Rango de tamaño entre 0 y 1 *mm*.

Tabla 4.3: Distribución de masa por fracción de tamiz en la primera pasada por el refinador.

Fracción	Rango de tamiz [mm]	Masa neta [g]	Masa relativa [%]
1	1,00–0,84	39,90	16,05
2	0,84–0,42	74,34	29,90
3	0,42–0,28	72,37	29,11
4	> 0,28	62,04	24,95
Total		248,65	100,00

Con las 3 muestras se analizan propiedades cualitativas de las espumas como manipulación, flexibilidad, densidad, cohesión térmica, de esto se obtiene que la muestra 3 expone una alta flexibilidad y cohesión térmica evidenciada en un aglutinamiento total, pero presenta una densidad alta ($\rho = 73 \text{ kg/m}^3$) y una alta pérdida de microfibras al manipularse. La muestra 1 expone una muy baja flexibilidad, cohesión térmica débil, presentando zonas sin aglutinamiento, una densidad baja ($\rho = 63 \text{ kg/m}^3$), la menor pérdida de microfibras, pero facilidad para romperse o partirse en la manipulación. La muestra 2 presenta una baja flexibilidad, una cohesión térmica incompleta, con pequeños puntos sin aglutinamiento, una densidad media ($\rho = 68 \text{ kg/m}^3$) y pérdida parcial de microfibrillas al manipularse.

La muestra 3 presenta propiedades más importantes para aislantes térmicos, sin embargo, la muestra 3 desprende una mayor cantidad de polvo celulósico y presenta una alta densidad. Por estos motivos se trabaja con un nuevo rango de tamaños.

- Muestra F: Rango de tamaño entre 0,28 y 1 *mm*.

Repitiendo los ensayos para la muestra F se obtiene una densidad baja ($\rho = 65,76 \text{ kg/m}^3$), lo que refleja una mayor porosidad, una cohesión térmica alta, sin aglomerados de PLA/PBS, con pérdidas de microfibras despreciables en su manipulación, y una flexibilidad alta, la cual presenta un mayor ángulo de flexión sin romperse. Es por esto que se selecciona la muestra F como muestra final y se repite el método, al ser el más eficiente para la formación del *fluff*. La imagen A15.1 demuestra estar más individualizada para mezclarse con el bicomponente, en contraste con los primeros prototipos, como muestra la imagen A16.1, donde se evidencian las aglomeraciones de bicomponente, siendo la espuma de la izquierda la que contiene rangos de fibra de la muestra 1 y la de la derecha la muestra 2. Cabe destacar que los ensayos para medir propiedades cualitativas se realizaron con espumas con 10 % de PLA/PBS en todas las muestras, a fin de que los resultados sean representativos.

4.2. Incorporación de fibra bicomponente y formación del manto

Se evalúan distintos porcentajes de PLA/PBS establecidos en la tabla 3.1 para analizar cualitativamente la cohesión térmica, la aglomeración de bicomponente o *fluff*, aspectos de la manipulación y homogeneidad a distintos porcentajes, pero con el mismo procedimiento.

Al termofijar espumas con las 5 proporciones descritas, se descartan las que contienen 20 y 25 %, ya que tienen una mezcla deficiente de PLA/PBS y *fluff*, que se ve reflejada en aglomeraciones excesivas de bicomponente, por ende, cohesión térmica deficiente, una baja homogeneidad visible tal como la figura A15.2, baja flexibilidad y propenso a romperse en su manipulación debido a generar mala unión entre fibras al presentar cúmulos de bicomponente.

La espuma con 15 % obtiene una mezcla uniforme, con aglomeraciones leves en puntos aislados (homogeneidad parcial), permitiendo una unión térmica fuerte entre fibras, pero aún presentando pequeños aglomerados de PLA/PBS, mostrando un margen de mejora en este aspecto. Presenta una flexibilidad media-baja y una pérdida de materia fibrosa despreciable (menos del 0,5 % del peso total) al manipularse.

Al evaluar la espuma con un 10 % de bicomponente se obtiene una mezcla homogénea, sin aglomeraciones, lo que evidencia un mejor mezclado y una cohesión térmica fuerte, una flexibilidad alta, pero una pérdida de masa considerable (entre 1 y 2 %).

La espuma con 5 % de concentración presenta una mezcla con baja homogeneidad reflejada en tener puntos sin bicomponente esto produce que tenga una cohesión térmica baja evidenciándose en que se resquebraja y pierde materia al manipular (más de 4 %).

Al evaluar las proporciones propuestas en metodología, se infiere que la espuma de 10 % presenta un comportamiento intermedio entre cohesión y manipulación, por lo que se trabaja con una segunda propuesta de proporciones.

Tabla 4.4: proporciones de composición de PLA/PBS y fluff de Quillay.

	Pulpa mecánica de quillay	Pulpa bi-componente (PLA/PBS)
P1	93 %	7 %
P2	90 %	10 %
P3	87 %	13 %

Para tener representatividad de los resultados se confeccionan 3 espumas de cada proporción presentada evaluando propiedades cualitativas y cuantitativas de estas para obtener un muestreo final.

Se evalúa la densidad promedio, repitiendo 3 mediciones para cada proporción.

$$V = L_x L_y B$$

$$\rho = \frac{m}{L_x L_y B}$$

De esta ecuación se obtiene:

Tabla 4.5: Densidad aparente de espumas Quillaja-PLA/PBS para distintas proporciones de fibra bicomponente.

PLA/PBS [% en masa]	Masa m [g]	Volumen V [m ³]	Densidad ρ [kg/m ³]
7	10,77	$1,55 \times 10^{-4}$	69,5
10	14,83	$2,20 \times 10^{-4}$	67,4
13	14,17	$2,20 \times 10^{-4}$	64,4

La espuma con 7 % de PLA/PBS presenta una mezcla parcialmente uniforme, con aglomeraciones de fibras *fluff* sin bicomponente, mejor cohesión térmica que la de 5 %, pero deficiente, pierde material lignocelulósico (entre un 2 y un 3 %). Con una alta flexibilidad y resistencia ante manipulación.

La espuma con 13 % de bicomponente presenta una mezcla totalmente uniforme, sin aglomeraciones, con una pérdida de materia despreciable (menos del 1 %), lo que infiere una unión térmica completa, una alta flexibilidad, dificultad para romper la muestra y la densidad promedio más baja de las muestras.

Considerando las 3 concentraciones descritas. Se determina que la proporción con el 13 % de PLA/PBS es la más adecuada, ya que presenta las mejores propiedades cualitativas, siendo

diferencial en la propiedad más importante: una unión térmica completa de las fibras y en cuanto a las cuantitativas tiene la menor densidad, la segunda mayor resistencia a la compresión como muestra la sección 4.8.

4.3. Resultados de termofijación

Para mejorar la homogeneidad de la muestra, se adiciona una tapa metálica que actúa como un disco de prensado, generando un peso y una presión; esto consigue una superficie y un fondo planos.

Se evalúa la temperatura de termofijación para espumas con 13 % de PLA/PBS en el horno de convección (A8.1), variando la temperatura en 3 ocasiones. La termofijación se realiza durante 10 minutos, debido a que en ensayos previos en laboratorio se determinó como un tiempo prudente para fundir la vaina sin fundir el núcleo.

- T1= 160°C
- T1= 170°C
- T1= 180°C

Al termofijar a 160°C se genera una cohesión incompleta, debido a que no se funde en su totalidad la vaina, se observa en la debilidad estructural de la espuma al desarmarse al quitar la espuma del molde, perdiendo su unión a pesar de estar sobre la temperatura de fusión del PBS, el tiempo de 10 minutos es insuficiente para una fusión total.

Termofijar a 180°C por 10 minutos genera una película dura en la superficie, lo que disminuye su porosidad y por ende sus propiedades térmicas, también ocurre una adhesión al molde, generando desprendimiento de material al desprender la espuma del molde, esto se debe a una fundición parcial del núcleo de PLA, provocando una degradación de las fibras.

Utilizar 170°C para termofijar por 10 minutos presenta una unión térmica completa que se evidencia en una integridad estructural completa sin adherirse en el fondo, infiriendo que se funde únicamente la vaina y en su totalidad. Por esto se determina que la temperatura de termofijación es 170°C.

4.4. Ensayos preliminares de caracterización térmica (modelo MATLAB)

Se implementa en MATLAB un modelo transitorio basado en conducción unidimensional, ajustado mediante minimización del error cuadrático. La ecuación de conducción unidimensional es descrita en la ecuación 3.7, con condiciones de contorno desarrolladas en la sección 3.4.

El espesor $B = 0,03\text{ m}$, densidad promedio de diversos ensayos $\rho = 64,47\text{ kg/m}^3$, y calor específico $C_p = 1479\text{ J/kg} \times K$. El valor de c_p se estima en la subsección 4.5.1, el cual se relaciona con estos parámetros a través de la ecuación:

$$k = \alpha \times \rho \times c_p \quad (4.1)$$

El ajuste del parámetro α se basa en la solución analítica en series de Fourier:

$$\theta(\eta, \tau) = 1 - \eta - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\pi\eta) \exp(-n^2\pi^2\tau) \quad (4.2)$$

Donde θ es la temperatura adimensional.

Se realiza un ajuste por mínimos cuadrados entre la solución teórica y datos experimentales a tres alturas distintas de termocupla respecto a la placa caliente ($x = 0,003, 0,015, 0,027\text{ (m)}$) y 156 tiempos ($t = 0$ hasta 3100 s).

Escenario 2: Espuma 30x30x3 cm

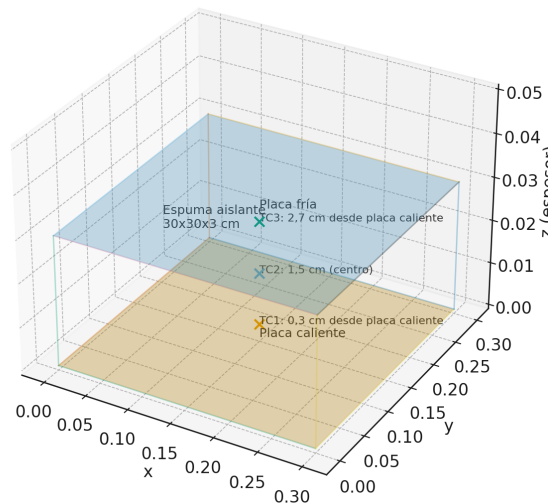


Figura 4.1: Colocación de termocuplas.

En esta imagen se puede visualizar la posición de las placas, la espuma y dónde va cada una de las 3 termocupas en el interior.

- termocupla 1: plano x,y,z (0,15,0,15,0,003)(metros)
- termocupla 2: plano x,y,z (0,15,0,15,0,015)(metros)
- termocupla 3: plano x,y,z (0,15,0,15,0,027)(metros)

Donde el 0 en el eje z comienza en la placa caliente.

La validación del modelo matemático se explica y detalla en el apéndice A18.

4.5. Propiedades térmicas experimentales

Se miden las propiedades térmicas, repitiendo la medición 3 veces con 3 espumas distintas, dos de la misma concentración de PLA/PBS (13 %), y una a concentración del 10 % de PLA/PBS. Utilizando el método expuesto en la sección 3.4, se calculan los valores de sus propiedades térmicas. Con esto, se compara cada ensayo con el modelo matemático descrito.

4.5.1. Estimación de la capacidad calorífica efectiva

La capacidad calorífica a presión constante se determina mediante un balance de masa. Este enfoque asume que la capacidad calorífica efectiva puede expresarse como una combinación lineal individual de cada componente, multiplicada por sus fracciones másicas:

$$c_p = \sum_i w_i c_{p,i} \quad (4.3)$$

donde w_i corresponde a la fracción másica del componente i y $c_{p,i}$ es su capacidad calorífica específica. Este método se utiliza comúnmente en materiales compuestos, mostrando una alta tasa de efectividad al comparar con resultados experimentales (Budiansky, 1970). El valor de k está condicionado por la estimación de c_p ; esto puede condicionar el valor exacto de k .

Para 2 fracciones másicas distintas, tenemos la siguiente ecuación.

$$c_p = w_{\text{fibra}} c_{p,\text{fibra}} + w_{\text{pol}} c_{p,\text{pol}} \quad (4.4)$$

La fibra de Quillay corresponde a un material lignocelulósico compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, por lo que sus propiedades térmicas pueden aproximarse a las de biomasa con densidad equivalente. Estudios experimentales han determinado la capacidad

calorífica específica de maderas lignocelulósicas mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC), reportando valores cercanos a $1400 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ a una temperatura de 300 K (Cai et al., 2018). Por otro lado, los polímeros biodegradables como el ácido poliláctico (PLA) presentan capacidades caloríficas del orden de 1500 a $1900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, determinadas mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) (Blanco et al., 2022).

Sustituyendo valores de $c_p = 1400 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ y $c_p = 1700 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ para Quillay y PLA/PBS (debido al valor promedio reportado) respectivamente:

$$c_p \approx 0,87 \cdot 1400 + 0,13 \cdot 1700 = 1479 \text{ J/kg}\cdot\text{K} \quad (4.5)$$

Sustituyendo para mezcla de 10% de PLA/PBS.

$$c_p \approx 0,9 \cdot 1400 + 0,1 \cdot 1700 = 1430 \text{ J/kg}\cdot\text{K} \quad (4.6)$$

4.5.2. Ensayo de propiedades térmicas 1

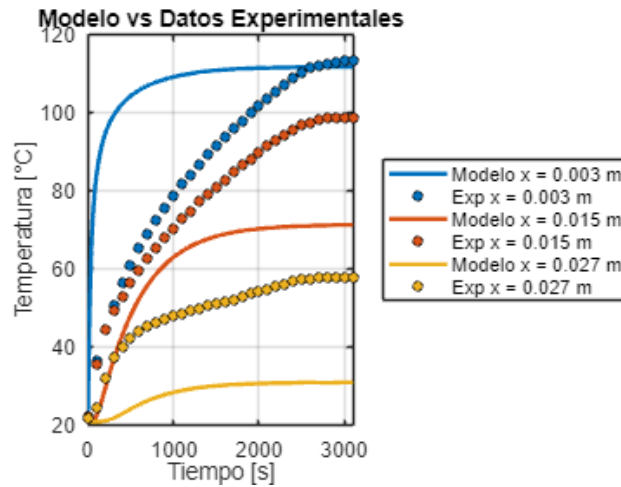


Figura 4.2: Comparación de resultados experimentales con modelo matemático 1.

Propiedades físicas del ensayo 1.

- Densidad $\rho = 64,57(\text{kg}/\text{m}^3)$
- Calor específico $c_p = 1479 (\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K})$

Luego de reemplazar estos valores en el modelo matemático.

- Difusividad térmica $\alpha = 1,853 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

- Conductividad térmica $k = 0,0176 \text{ W/mK}$
- Resistencia superficial $R'' = 1,7051 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$
- Resistencia total $R = 18,9457 \text{ K/W}$
- Error cuadrático $SSE = 16,7938$
- Términos usados en la serie (máx.): 100

Representando el comportamiento térmico de una muestra al 13 % de PLA/PBS con 3 cm de espesor y con las termocupas ubicadas tal como muestra la figura 4.1, mostrando un error cuadrático alto, esto debido a las suposiciones, y se puede atribuir a una mala técnica de fijado de las termocupas, sin embargo, muestra un valor preliminar bajo respecto a otros aislantes comunes que están entre 0,03 y 0,05 W/mK. Este valor se ve influenciado por simplificaciones del modelo y suposiciones experimentales.

4.5.3. Ensayo de propiedades térmicas 2

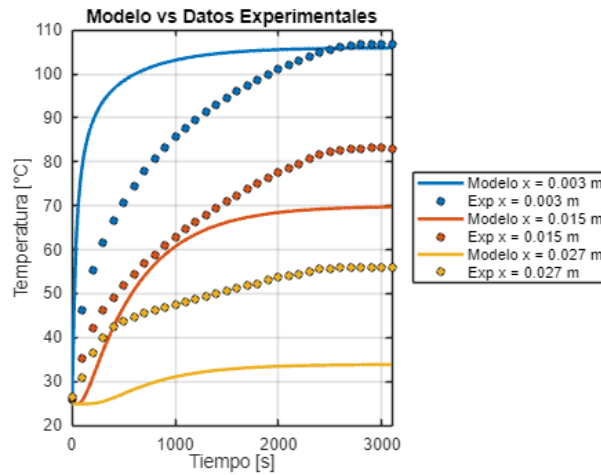


Figura 4.3: Comparación de resultados experimentales con modelo matemático 2.

Propiedades físicas del ensayo 2.

- Densidad $\rho = 64,21(\text{kg/m}^3)$
- Calor específico $c_p = 1479 (\text{J/kg}\cdot\text{K})$

Luego de reemplazar estos valores en el modelo matemático.

- Difusividad térmica $\alpha = 1,664 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- Conductividad térmica $k = 0,0159 \text{ W/mK}$

- Resistencia superficial $R'' = 1,8854 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$
- Resistencia total $R = 20,9484 \text{ K/W}$
- Error cuadrático $SSE = 13,2500$
- Términos usados en la serie (máx.): 100

Representando el comportamiento térmico de una muestra con las mismas condiciones que la anterior, disminuyendo el error cuadrático y mejorando las propiedades térmicas.

4.5.4. Ensayo de propiedades térmicas 3

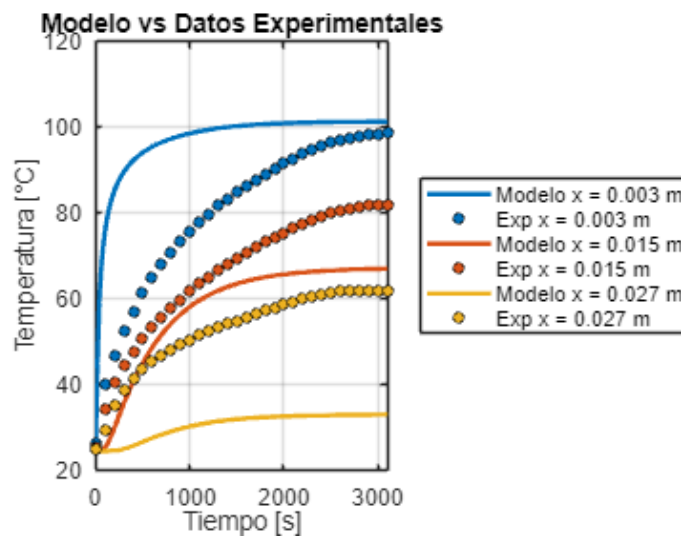


Figura 4.4: Comparación de resultados experimentales con modelo matemático 3.

Propiedades físicas del ensayo 3

- Densidad $\rho = 67,26(\text{kg/m}^3)$
- Calor específico $c_p = 1430 (\text{J/kg}\cdot\text{K})$

Luego de reemplazar estos valores en el modelo matemático.

- Difusividad térmica $\alpha = 1,726 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- Conductividad térmica $k = 0,0166 \text{ W/mK}$
- Resistencia superficial $R'' = 1,8073 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$
- Resistencia total $R = 20,0813 \text{ K/W}$
- Error cuadrático $SSE = 22,5028$

- Términos usados en la serie (máx.): 100

De estos gráficos se puede inferir que el modelo matemático no predice de manera correcta el comportamiento térmico de la muestra. Esta diferencia se atribuye a las simplificaciones del modelo, tales como la suposición de conducción unidimensional, la ausencia de pérdidas laterales y la consideración de propiedades térmicas constantes. Además, se asume temperaturas constantes, las cuales en el ensayo real sí presentan pequeñas variaciones.

Los valores de conductividad térmica que se obtienen en los 3 ensayos se encuentran en el rango inferior reportado para materiales lignocelulósicos de baja densidad. Esta diferencia puede atribuirse a la alta porosidad del material desarrollado, lo que contribuye a una mayor fracción de aire en su estructura interna. Al comparar los valores de la espuma con 10 % y 13 % de PLA/PBS, se puede notar que el error cuadrático aumenta en la espuma con 10 %, sin embargo, los valores reportados son del mismo orden, de hecho, se encuentran entre los dos ensayos medidos al 13 %, pero el ensayo térmico que mejores resultados obtiene es con 13 % de bicomponente, dejando este resultado como resultado final, debido a ser la prueba más eficiente en cuanto a valores, y además este ensayo es el que cuenta con menos variaciones en el laboratorio, ya que tanto puertas, ventanas o cualquier entrada de aire se mantiene cerrada únicamente en el ensayo 2 eliminando así corrientes de aire que pueden afectar las pérdidas de calor en la espuma, con un error alto atribuido a las suposiciones descritas en la sección 3.4.

$$k_{13\%} = 0,0159 \text{ W/m}\cdot\text{K} \quad (4.7)$$

$$k_{10\%} = 0,0166 \text{ W/m}\cdot\text{K} \quad (4.8)$$

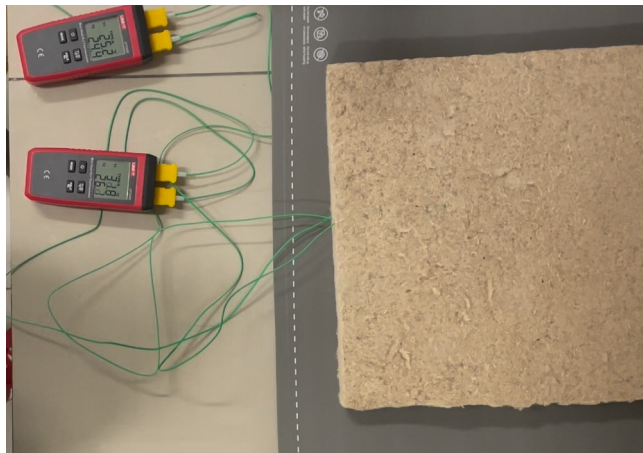


Figura 4.5: Medición de propiedades térmicas.

En esta figura se visualiza la espuma aislante previa a los experimentos térmicos, junto con las termocuplas para la medición en cada punto del espesor. Esta espuma es de $30 \times 30 \text{ cm}$ y 3 cm de espesor para cada ensayo térmico.

4.6. Propagación ignífuga

La adición de bórax anhidro se realiza mediante dilución en agua al 5 %, incorporándolo mediante un atomizador a una espuma ya termofijada y al 13 % de PLA/PBS. De manera tal que la espuma queda impregnada por todas sus caras e interior. Se seleccionan 5 mL de la solución para una espuma de 3 gramos. Con esto se obtiene que la espuma pase de incendiarse en 1,3 segundos (sin bórax anhidro) a no incendiarse luego de 1 minuto 30 segundos bajo la exposición a una llama directa como muestra la espuma superior en la figura A10.2.

Se asume que la densidad de la solución es igual a la del agua:

$$\rho_{\text{solución}} \approx 1 \text{ g/mL}$$

Por lo tanto, para un volumen de 5 mL :

$$m_{\text{solución}} = \rho_{\text{solución}} \cdot V = 1 \text{ g/mL} \times 5 \text{ mL} = 5 \text{ g}$$

Si la solución está al 5 % en masa de bórax anhidro, la masa es:

$$m_{\text{bórax}} = w_{\text{bórax, sol.}} \cdot m_{\text{solución}} = 0,05 \times 5 \text{ g} = 0,25 \text{ g}$$

En 5 mL de solución hay.

$$m_{\text{bórax}} = 0,25 \text{ g} \quad m_{\text{espuma}} = 3,0 \text{ g}$$

La fracción másica de bórax respecto de la espuma se calcula.

$$w_{\text{bórax}} = \frac{m_{\text{bórax}}}{m_{\text{espuma}}} \times 100 \text{ \%}.$$

Sustituyendo los valores:

$$w_{\text{bórax}} = \frac{0,25 \text{ g}}{3,0 \text{ g}} \times 100 \text{ \%} \simeq 8,3 \text{ \%}$$

Es decir, 5 *ml* de la solución contiene 0,25 gramos de bórax en 3 gramos de espuma, lo que equivale a un porcentaje de 8,3 %.

El bórax anhidro favorece la formación de una capa carbonizada que limita la propagación del fuego. En vista de los resultados y de la literatura se selecciona este método de adición y proporciones para toda espuma aislante realizada en los ensayos.

4.7. Blancura

Para este tipo de espumas la blancura se mide mediante el método CIE whiteness y en el espacio de color CIE L*a*b. El cual se escoge por tener un espectro más amplio y evaluar mejor los tonos amarillos, como es el caso.

La medición se realiza a dos espumas al 13 % de PLA/PBS, una sin finos y otra con finos, para mostrar cómo cambia su uniformidad colorimétrica.

Tabla 4.6: Resultados de blancura de la espuma sin polvo celulósico.

Muestra s/f	L	a	b	λ (nm)	Reflectancia	WI (CIE/ISO/AATC)	WI (ISO)
1	68.37	2.60	14.65	400	17.38	-48.05	28.5
2	61.55	3.09	14.38	400	13.30	-62.21	21.5
3	63.71	2.64	13.58	400	14.96	-52.42	24.5
4	62.75	2.77	14.34	400	13.68	-59.30	22.5
5	65.01	2.84	15.01	400	14.61	-58.09	24.5
6	65.58	2.78	14.84	400	15.76	-55.77	25.5
7	64.50	2.68	14.50	400	14.83	-56.26	24.5
8	63.36	2.40	13.63	400	14.44	-53.59	23.5
9	66.39	2.78	15.22	400	15.57	-56.10	26.5
10	62.40	2.65	13.56	400	14.45	-55.26	23.5
Promedio	64.362	2.723	14.371	400	14.898	-55.705	24.5

Tabla 4.7: Resultados de blancura de la espuma con polvo celulósico.

Muestra C/f WI (ISO R457)	L	a	b	λ (nm)	Reflectancia	WI (CIE/ISO/AATC)
1 19.38	58.29	2.46	13.20	400	12.23	-62.19
2 13.15	49.52	2.34	12.01	400	8.28	-73.14
3 18.23	56.88	2.42	13.13	400	11.34	-64.87
4 9.21	42.13	2.32	10.53	400	5.88	-77.41
5 18.77	58.00	2.50	14.02	400	11.27	-68.26
6 22.97	62.66	2.32	14.06	400	14.38	-57.92
7 22.40	61.90	2.31	13.77	400	13.82	-58.83
8 22.23	61.76	2.56	13.79	400	13.94	-58.16
9 23.47	62.98	2.26	13.73	400	14.88	-55.13
10 13.43	49.51	2.30	11.23	400	8.68	-67.24
Promedio 18.324	56.363	2.379	12.947	400	11.47	-64.315

Donde:

- L*: Luminosidad del material (0 = negro, 100 = blanco); indica qué tan clara es la espuma.
- a*: Componente cromática verde (-) a rojo (+); mide desviación hacia tonos rojizos o verdosos.
- b*: Componente cromático azul (-) a amarillo (+); valores altos indican amarilleo del material.
- Longitud de onda (λ) de medición.
- Reflectancia: Porcentaje de luz reflejada a λ , mientras más alto sea el valor, más cercano al blanco es la muestra.
- WI (CIE/ISO/AATCC): Índice de blancura basado en L*, a*, b*; evalúa blancura percibida considerando tono y luminosidad del espacio de color elegido.

- WI (ISO R457): Índice de blancura basado en la reflectancia azul; mide la blancura instrumental sin considerar el tono completo.

Para cada espuma se realiza la medición en 10 puntos equidistantes (4 *cm*) a lo largo del borde, para así tener una muestra representativa, reduciendo el error, mediante el espectrómetro, como muestra la figura A2.1 De esto se puede inferir que la espuma con micropartículas tiene una distribución con baja homogeneidad colorimétrica, debido a su diferencia en valores de blancura entre cada punto, mientras que la espuma sin polvo celulósico presenta una mayor homogeneidad en los valores de blancura, si bien la blancura no es un parámetro que sea importante en aislantes térmicos, si nos da un resultado importante, el eliminar el polvo celulósico es crucial para obtener una espuma con un color uniforme.

4.8. Resultados mecánicos

La resistencia a la compresión se evalúa al 50 % de deformación, valor comúnmente utilizado en espumas aislantes para caracterizar su comportamiento ante colapso estructural, donde la deformación se ve afectada por la inestabilidad elástica y compactación de la estructura porosa (Gibson and Ashby, 1997).

Se mide la compresión al 50 % para 3 proporciones distintas de PLA/PBS (7 %, 10 % y 13 %). Se les nombra M1, M2 y M3 respectivamente, para muestras de 40 *mm*² de área y una altura distinta para cada muestra:

- M1=14 *mm*
- M2=24 *mm*
- M3=20 *mm*

Se realizan 3 mediciones para cada una de las 3 espumas distintas con las mismas dimensiones, para obtener una muestra representativa. Este ensayo entrega la fuerza necesaria para desplazar la altura total de cada muestra en un 50 %.

Para obtener el esfuerzo realizado para comprimir cada muestra, se requiere hacer un tratamiento de datos dividiendo cada fuerza en el área, obteniendo así la tensión y además se divide el desplazamiento realizado entre la altura total para obtener el porcentaje de deformación, con estos datos se grafica para encontrar el punto en que alcanza la deformación deseada.

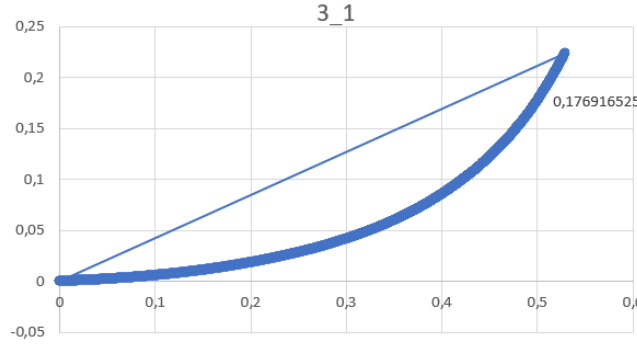


Figura 4.6: Gráfico representativo del esfuerzo requerido.

Con los datos se realiza un gráfico para cada ensayo como el representado en la figura 4.6, obteniendo un promedio por muestra. El gráfico se utiliza para encontrar el punto exacto de 50 % de compresión luego del tratamiento de datos.

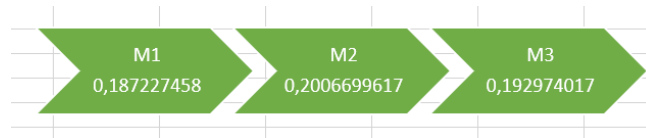


Figura 4.7: Promedio de cada muestra con 3 repeticiones cada una.

A estos valores se les calcula su desviación estándar mediante la ecuación.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.9)$$

Para cada porcentaje:

$$s_{7\%} = \sqrt{\frac{(x_1 - 0,187)^2 + (x_2 - 0,187)^2 + (x_3 - 0,187)^2}{3-1}} = 0,044 \text{ MPa} \quad (4.10)$$

$$s_{10\%} = \sqrt{\frac{(x_1 - 0,207)^2 + (x_2 - 0,207)^2 + (x_3 - 0,207)^2}{3-1}} = 0,091 \text{ MPa} \quad (4.11)$$

$$s_{13\%} = \sqrt{\frac{(x_1 - 0,193)^2 + (x_2 - 0,193)^2 + (x_3 - 0,193)^2}{3-1}} = 0,049 \text{ MPa} \quad (4.12)$$

Se observa una dispersión significativa en los resultados, particularmente en la muestra con 10 % de PLA/PBS. Esto se debe a que el material tiene una distribución de la porosidad no

uniforme, con variaciones locales en densidad debido a estar más compactado en ciertas zonas. Estas diferencias estructurales generan respuestas mecánicas distintas bajo carga.

De esto se desprende que la que menor resistencia ofrece a comprimirse es la muestra 1 con 7 % PLA/PBS y la que ofrece la mayor resistencia es la muestra 2 con 10 % PLA/PBS, sin embargo, la dificultad de cortar las muestras para tener espumas de $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ (el área del equipo de laboratorio), hace que las muestras no sean regulares, dejando abierta la duda de si un equipo con mayor diámetro pudiera entregar datos mas fidedignos, o en su defecto realizar un corte mas limpio, mediante láser, podría dar mejores resultados al respecto.

4.9. Hinchamiento de la espuma

Para realizar el experimento se hunde la espuma en agua durante 20 minutos para analizar cuánto crece la espuma, su absorción en peso y si se rompe a la hora de manipularla.

Luego del ensayo

- crecimiento: 7,14 % de 2,8 cm a 3 de espesor
- absorción: Peso inicial: 15,879 gramos, peso final: 81,301 gramos. Con un 412 % de aumento
- rompimiento: No

Esto dice que el crecimiento está dentro de los rangos normales, sin embargo, la absorción es muy alta, dando como consecuencia que, al mojarse, pierda gran parte de sus propiedades térmicas. Esto se debe a que el agua llena los poros que contienen aire, y el agua tiene una conducción térmica mayor que el aire. Esto limita fuertemente su aplicación en condiciones de humedad, lo que se traduce en una de las principales debilidades del material. No obstante, el aislante está diseñado para que sea utilizado aislado de fuentes de agua o de lluvia.

4.10. Análisis técnico y económico

Para evaluar el costo económico de las materias primas, se realiza una cotización de astillas residuales de quillay, bórax, PLA/PBS, costo energético (KWH) de equipos, mano de obra y agua por kilogramo utilizado

Para obtener el valor de las astillas de quillay se cotiza con la industria desert king Chile, quienes entregaron el valor de venta de $12 \text{ USD}/\text{m}^3$ en venta al por mayor, teniendo en cuenta que la densidad aparente de las astillas de Quillay se estimó utilizando valores típicos reportados para chips lignocelulósicos no compactados, correspondientes a un rango de $160\text{--}182 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Bajpai, 2018). Se consideró un valor promedio de $170 \text{ kg}/\text{m}^3$.

El costo de bórax anhidro se cotiza en *químicaindustrial.cl*, con un costo por kilo de 9461 CLP y un costo al por mayor de 5500 CLP por kg (Química Industrial, 2026). Con el precio actual del dólar, el costo es de 6,10 USD/kg al por mayor.

El costo de la fibra bicomponente PLA/PBS se estima utilizando precios industriales reportados para fibras biodegradables utilizadas en aplicaciones de termofijación y textiles no tejidos, considerando un valor de 4,30 USD/kg para compras mayoristas (Alibaba, 2026)

El valor del agua se estima mediante la información oficial de Essbio en Concepción, considerando las tarifas comerciales, alcantarillado y gastos asociados un costo de 2500 CLP por metro cúbico traducido a 2,8 USD/m^3

Se utilizan valores al por mayor con el fin de estimar una producción industrial

4.10.1. Análisis económico preliminar

La muestra seleccionada corresponde a una espuma con 13 % de PLA/PBS, con una densidad aparente promedio de 64,4 kg/m^3 .

Para calcular los costos se consideró un panel de dimensiones $30 \times 30 \times 3$ cm, obteniéndose un volumen:

$$V = 0,30 \times 0,30 \times 0,03 \quad (4.13)$$

$$V = 0,0027 \text{ m}^3 \quad (4.14)$$

Utilizando la densidad experimental promedio de la espuma óptima:

$$m = 64,4 \text{ kg/m}^3 \times 0,0027 \text{ m}^3 \quad (4.15)$$

$$m = 0,174 \text{ kg} \quad (4.16)$$

Considerando la composición de la muestra final:

$$m_{PLA/PBS} = 0,174 \times 0,13 \quad (4.17)$$

$$m_{PLA/PBS} = 0,0226 \text{ kg} \quad (4.18)$$

$$m_{Quillay} = 0,174 \times 0,87 \quad (4.19)$$

$$m_{Quillay} = 0,151 \text{ kg} \quad (4.20)$$

Considerando un valor de $12 \text{ USD}/m^3$ para las astillas de *quillaja saponaria* y utilizando la densidad aparente estimada de $170 \text{ kg}/m^3$ para astillas de quillay residuales no compactadas, se obtiene:

$$C_{Quillay} = \frac{12}{170} \quad (4.21)$$

$$C_{Quillay} = 0,071 \text{ USD}/kg \quad (4.22)$$

Por otra parte, el costo de la fibra bicomponente PLA/PBS se considera con un valor de $4,3 \text{ USD}/kg$.

El costo estimado de materias primas por panel es:

$$C_{PLA/PBS} = 0,0226 \times 4,3 \quad (4.23)$$

$$C_{PLA/PBS} = 0,097 \text{ USD} \quad (4.24)$$

$$C_{Quillay} = 0,151 \times 0,071 \quad (4.25)$$

$$C_{Quillay} = 0,007 \text{ USD} \quad (4.26)$$

Los resultados muestran que las astillas residuales de quillay representan una fracción menor del costo total debido a ser un subproducto de un proceso industrial conocido, mientras que la fibra bicomponente PLA/PBS constituye el principal componente económico del material, mientras

que el borax al ser un 8 % del peso del material posterior a su producción se considera su costo por kilos utilizados es decir 6,1 USD/kg

Adicionalmente, se consideraron costos asociados a energía eléctrica, agua y mano de obra. El costo de energía eléctrica se calcula mediante tarifas reguladas AT4.3 (alta tensión y alta demanda) en Chile, considerando un valor promedio de 120 CLP/kWh , mientras que el agua potable fue estimada en 2500 CLP/m^3 , según tarifas industriales de ESSBIO.

Desde el punto de vista técnico, la espuma desarrollada presenta una conductividad térmica experimental de:

$$k = 0,0159 \text{ W}/(m \cdot K) \quad (4.27)$$

Valor inferior al reportado para diversos aislantes comerciales convencionales como EPS, XPS y lana mineral. Esto sugiere un alto potencial como aislante térmico sustentable.

Se considera un costo operativo descrito con una producción inicial de 100.000 $kg/año$ escalando hasta llegar a 180.000 $kg/año$.

Además, se consideran costos de inversión, costos operacionales, depreciación de equipos, un horizonte de evaluación de 10 años y estimación de ingresos por la venta del producto.

La inversión inicial estimada (CAPEX) fue de aproximadamente 924.320 USD, considerando equipamiento industrial asociado a refinación, cardado, termofijación, control ambiental, instrumentación del proceso, montaje e instalación, instalación eléctrica y obras civiles. Por otra parte, el costo operacional inicial (OPEX) fue estimado en aproximadamente 136.000 USD/año para una producción inicial de 100.000 $kg/año$, incorporando materias primas, energía eléctrica, agua, mano de obra, mantención, climatización, transporte y costos auxiliares de operación (p.ej. reposición de moldes). Como extra, también se considera una inflación del 3 % anual para el aumento de costos operacionales y el aumento del precio de venta.

Para estimar el costo de venta se consideró los costos operacionales (OPEX), la inversión inicial (CAPEX), la producción creciente hasta llegar a 180.000 kilos por año, se consideró también un margen para recuperar la inversión inicial y que sea competitivo frente a precios comerciales como el EPS que tras una cotización de obtuvo un valor de 4800 CLP por kilo de aislante para EPS de 50 mm de espesor y 15 kg/m^3 según (Termomat, 2026), es decir 5,26 USD por kg con el cambio de 912 CLP= 1 USD, por estos motivos se considero un precio optimo inicial de 4 USD por kg

El análisis mediante flujo de caja descontado entrega un Valor Actual Neto (VAN) de 1.188.683 USD y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 31,68 %, valores superiores a la tasa de descuento

considerada para la evaluación, reflejando una viabilidad económica positiva.

Este análisis permite estimar una recuperación de la inversión (Payback) en 5 años, esto sugiere una recuperación relativamente rápida de la inversión inicial dentro del horizonte de evaluación considerado.

Los resultados obtenidos muestran que el material desarrollado presenta potencial económico favorable, especialmente debido a sus propiedades térmicas competitivas, comportamiento ignífugo y carácter sustentable. Sin embargo, cabe destacar que el presente análisis corresponde a una evaluación preliminar y no incorpora aún optimización avanzada de proceso, economías de escala ni validación industrial completa. El flujo de caja detallado utilizado para el análisis se presenta en el apéndice A19.

4.11. Resultados de caracterización

Se realizaron mediciones mecánicas y térmicas de diversos aspectos para completar la caracterización de la espuma a trabajar.

La tabla 4.8 muestra la nomenclatura utilizada en esta memoria.

Tabla 4.8: Parametros utilizados.

Símbolo	Descripción	Unidad
B	Espesor del panel de espuma	m
A	Área efectiva del panel	m ²
ρ	Densidad aparente	kg/m ³
C_p	Calor específico (valor adoptado para el ajuste)	J/(kg·K)
α	Difusividad térmica	m ² /s
k	Conductividad térmica	W/(m·K)
R''	Resistencia térmica superficial ($R'' = B/k$)	m ² K/W
R	Resistencia térmica global ($R = B/(kA)$)	K/W
t_{ign}	Tiempo a ignición	s

Tabla 4.9: Resumen consolidado de propiedades del material aislante desarrollado.

Parámetro	Valor
Propiedades físicas	
Densidad, ρ (kg/m ³)	64,14
	7 %: $0,187 \pm 0,044$
Resistencia a compresión al 50 % (MPa)	10 %: $0,207 \pm 0,091$
	13 %: $0,193 \pm 0,049$
Propiedades térmicas	
Capacidad calorífica, C_p (J/kgK)	1430 (10 %) – 1479 (13 %)
Difusividad térmica, α (m ² /s)	$1,65 \times 10^{-7}$
Conductividad térmica, k (W/mK)	0,0159
Resistencia térmica areal, R'' (m ² K/W)	0,624
Resistencia térmica global, R (K/W)	21,4039
Propiedades higroscópicas	
Absorción de agua (%)	412
Expansión volumétrica (%)	7,14
Comportamiento frente al fuego	
Tiempo a ignición sin tratamiento (s)	1,3
Respuesta con bórax	No presenta ignición

Capítulo 5

Conclusión

El presente trabajo permitió demostrar la viabilidad técnica de producir espumas aislantes de baja densidad a partir de residuos lignocelulósicos de *Quillaja saponaria*, mediante un proceso de termofijación con fibras bicomponentes (PLA/PBS) sin la utilización de adhesivos líquidos. Tras los resultados se confirma que es posible generar un aislante térmico empleando fibra corta como componente principal. Estructuralmente, se mejoró la resistencia, el aspecto morfológico y la estandarización del proceso.

Se identificó que las variables críticas del proceso corresponden al método de mezclado, la distribución de fibras, el contenido de fibras de tamaño adecuado como base y el contenido de fibra bi-componente. En particular, el uso de inyección de aire como método de mezcla, la clasificación del fluff con un rango de 1,00 mm– 0,28 mm, una proporción de 13 % de fibra PLA/PBS y condiciones de termofijación de 170°C durante 10 minutos, permitió una fundición total de la vaina sin afectar el núcleo del bicomponente, lo que derivó en un material homogéneo, con adecuada estabilidad estructural y una densidad aparente cercana a 64 kg/m³.

Se observó que las fibras de PLA/PBS de 4 mm presentaron un mejor mezclado y unión térmica con la pulpa *fluff* de Quillay en comparación con las fibras de PLA/PLA de 6 mm.

Se consolidaron valores óptimos respecto a las propiedades térmicas como la conductividad, resistencia y difusividad térmica. Se encontraron valores de $\alpha = 1,605 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $k = 0,159 \text{ W/mK}$, situando al material dentro del rango de aislantes térmicos de alta eficiencia, siendo comparables e incluso inferiores a los valores típicos reportados para materiales convencionales como el poliestireno expandido (EPS), cuyo rango se encuentra entre 0,03 y 0,04 W/m·K. Esto posiciona el aislante trabajado como una alternativa competitiva en aplicaciones de aislación térmica. No obstante, estos resultados fueron obtenidos mediante un modelo transitorio ajustado experimentalmente, por lo que resulta necesaria su validación a través de metodologías

normalizadas (ASTM o ISO) para permitir comparaciones directas con materiales aislantes bajo condiciones estandarizadas.

Los resultados de la evaluación económica indican una viabilidad favorable para llevar a cabo una producción industrial. Con un VAN positivo, la TIR superior a la tasa de descuento con amplio margen y un período de recuperación cercano a 5 años, lo que sugiere condiciones económicas favorables bajo los supuestos considerados. Si bien es necesario realizar una proyección más pesimista y con más variables a considerar, el proyecto tiene una diferencia a favor con mucho margen.

A pesar del buen desempeño térmico, se identificaron limitaciones relevantes, como la absorción de agua del material, alcanzando valores cercanos al 412 %. Este comportamiento puede afectar negativamente su desempeño térmico en condiciones reales de operación, sin embargo, su uso debe ser aislado de fuentes de agua o lluvias.

Tras la realización de este estudio, se puede establecer que utilizar fibra corta para la producción de espumas aislantes es posible y con buenas propiedades aislantes. Se pueden realizar mejoras al estandarizar las normas de caracterización. Además, se puede mejorar la producción de la pulpa y el fluff con una mayor cantidad de refinadores, una temperatura controlada y un ajuste más preciso de la selección de los tamaños necesarios de fibra. También se pueden realizar mejoras sustanciales en un cardado industrial que ordena las fibras en una única dirección, generando sentido único de fibras, produciendo una mayor aislación térmica a lo largo del espesor de la espuma debido a que el calor viajará contra la dirección de la fibra. A pesar del buen desempeño térmico, se identificaron limitaciones relevantes, como la absorción de agua del material, alcanzando valores cercanos al 412 %. Este comportamiento puede afectar negativamente su desempeño térmico en condiciones reales de operación, sin embargo, su uso debe ser aislado de fuentes de agua o lluvias. La implementación de tecnologías más avanzadas o adecuadas al proceso y la validación con equipos normalizados es clave para conformar un aislante competitivo en el mercado.

Bibliografía

- (2023). Astm c578-23 standard specification for rigid, cellular polystyrene thermal insulation.
- Abu-Jdayil, B., Mourad, A.-H., Hittini, W., Hassan, M., and Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214:709–735.
- Alibaba (2026). Fiber with pla bicomponent for thermal bonding and nonwoven applications. Accedido el 19 de mayo de 2026.
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., and Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4:1–17.
- ASTM International (2015). Astm c518-15: Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. Standard.
- Bajpai, P. (2018). Bulk density. In *Biermann's Handbook of Pulp and Paper*. Elsevier, 3 edition. Accedido el 27 de mayo de 2026.
- Blanco, I., Cicala, G., Recca, G., and Tosto, C. (2022). Specific heat capacity and thermal conductivity measurements of pla-based 3d-printed parts. *Entropy*, 24(5):654.
- Budiansky, B. (1970). Thermal and thermoelastic properties of isotropic composites. *Journal of Composite Materials*, 4(3):286–295.
- Cai, J., Liu, R., and Chen, H. (2018). Measurement and correlation of specific heat capacity of biomass materials. *Fuel*, 224:357–364.
- Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, 2 edition.
- Cengel, Y. A. and Ghajar, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, New York, 5th edition.
- Domtar (2023). The airlaid manufacturing process. PDF. Accessed December 14, 2025.
- EUMEPS (2023). Expanded polystyrene (eps) technical data. European Manufacturers of Expanded Polystyrene.
- Fleck, J. D., Betti, A. H., Da Silva, F. P., Troian, E. A., Olivaro, C., Ferreira, F., and Verza, S. G. (2019). Saponins from *Quillaja saponaria* and *Quillaja brasiliensis*: Particular chemical characteristics and biological activities. *Molecules*, 24(1):171.

- Gibson, L. J. and Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press.
- Greenfiber (2023). Cellulose insulation product data.
- Huntsman Corporation (2022). Polyurethane insulation systems.
- Hurtado, P., Rouilly, A., Vandenbossche, V., and Delgado Raynaud, C. (2015). A review on the properties of cellulose fibre insulation. *Building and Environment*, 96.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, 6 edition.
- International Organization for Standardization (1991a). Iso 8301: Thermal insulation — determination of steady-state thermal resistance and related properties — heat flow meter apparatus. Standard.
- International Organization for Standardization (1991b). Iso 8302: Thermal insulation — determination of steady-state thermal resistance and related properties — guarded hot plate apparatus. Standard.
- Kingspan Group (2023). Xps insulation technical guide.
- Long, L.-Y., Weng, Y.-X., and Wang, Y.-Z. (2018). Cellulose aerogels: Synthesis, applications, and prospects. *Polymers*, 10(6):623.
- Malagón Micán, M. L., Velásquez-Baracaldo, L. M., and García-Camacho, W. F. (2020). Evaluación del uso de fibras lignocelulósicas para el reforzamiento de espumas rígidas de poliuretano. *Inge CuC*, 16(1):116–128.
- Mao, N. and Russell, S. J. (2011). Thermal bonding of bicomponent fibres in nonwoven materials. *Journal of Materials Science*, 46:1–12.
- Mitsubishi Chemical Corporation (n.d.). Biodegradable polymer biopbs. Accessed 2025-12-14.
- NatureWorks LLC (n.d.). Ingeo™ fibre apparel product guidelines: Fiber to fabric. PDF. Accessed 2025-12-14.
- Özisik, M. N. (1993). *Heat Conduction*. John Wiley & Sons, 2 edition.
- Patcharee Pratumpong, T., Cholprecha, T., Roungpaisan, N., Srisawat, N., Surachet Toommee, S., Pechyen, C., and Parcharoen, Y. (2023). Effects of melt-blown processing conditions on nonwoven polylactic acid and polybutylene succinate. *Polymers*, 15(20):4189.
- Pavatex (2023). Wood fiber insulation boards.
- Química Industrial (2026). Bórax anhidro. Precio comercial referencial utilizado para estimación económica. Accedido el 19 de mayo de 2026.
- Rockwool International (2023). Stone wool insulation technical information.
- Russell, S. J., editor (2007). *Handbook of Nonwovens*. Woodhead Publishing.
- Sixta, H. (2006). *Handbook of Pulp*. Wiley-VCH.
- Smook, G. A. (2002). *Handbook for Pulp and Paper Technologists*. Angus Wilde Publications.

- Srisuk, T., Charoenlarp, K., and Kampeerapappun, P. (2024). Utilization of waste natural fibers mixed with polylactic acid (pla) bicomponent fiber: Incorporating kapok and cattail fibers for nonwoven medical textile applications. *Polymers*, 16(1):76.
- Termomat (2026). Poliestireno expandido (eps) para aislación térmica. Consultado el 1 de junio de 2026.
- U.S. Department of Energy (n.d.). Insulation. Accessed 2025-12-14.
- Xie, Y., Tong, Q., Cai, Z., Li, L., and Li, K. (2011). Manufacture and properties of ultra-low density fiberboard. *BioResources*, 6(4):4055–4066.

Apéndice A

Anexos

A1. Representación 3D

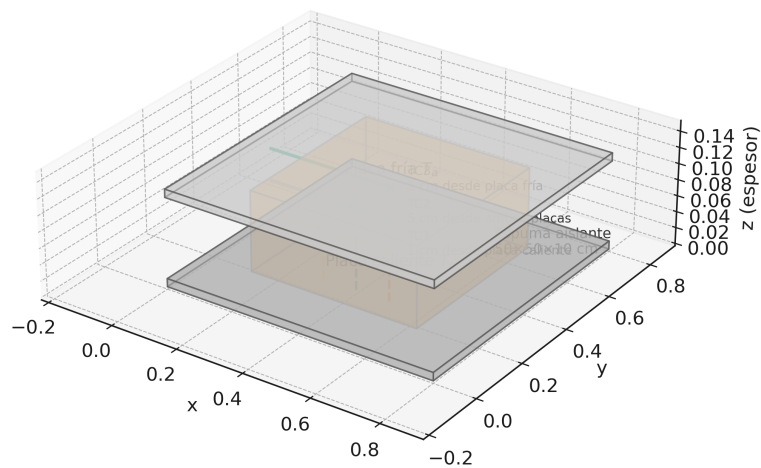


Figura A1.1: Orientación de espuma en amarillo y placas en gris.

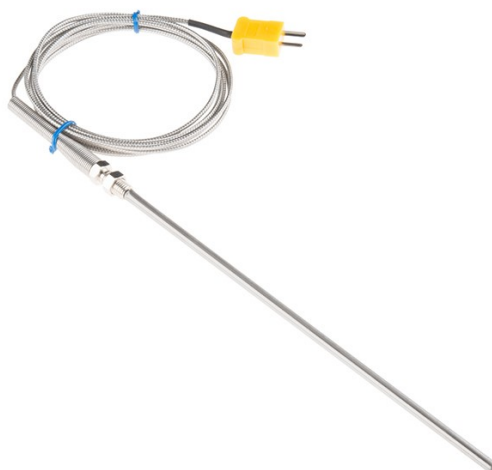
A2. Colorimetro



Figura A2.1: colorimetro spectromether

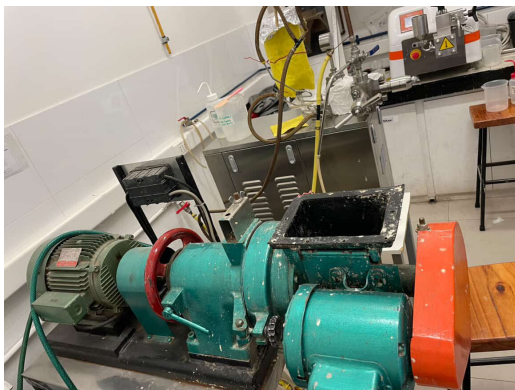
A3. Termocupla

Figura A3.1: Termocupla tipo K



A4. Refinador de discos

Figura A4.1: Refinador utilizado para realizar pulpa y fluff



A5. Sistema cerrado de inyección de aire

Figura A5.1: sistema utilizado para mezclar PLA/PBS con fluff



A6. Compresor

Figura A6.1: Compresor que inyecta aire a 6 bar de presión



A7. Balanza digital

Figura A7.1: Balanza



A8. Horno convectivo

Figura A8.1: Horno a convección para termo-fijación a 170°C



A9. molde pequeño

Figura A9.1: Molde realizado para hacer muestras de área 10x10

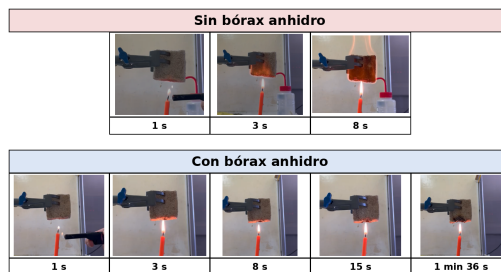


A10. Impregnación de bórax anhidro

Figura A10.1: muestra sin bórax y con bórax



Figura A10.2: esquema sin bórax y con bórax



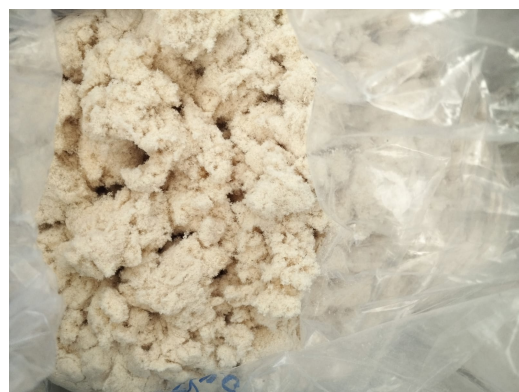
A11. Tamices

Figura A11.1: Tamices de distinto diámetro



A12. Fluff de pino

Figura A12.1: Fluffing realizado con pulpa de pino industrial

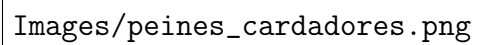


A13. Clasificación



Figura A13.1: Fracciones de pulpa mecánica obtenidas mediante tamizado (muestras 1 a 4 de izquierda a derecha).

A14. Peines cardadores



Images/peines_cardadores.png

Figura A14.1: Peines para cardado manual.

A15. Metodos de mezclado



Figura A15.1: Manto formado mediante técnica de inyección de aire.



Figura A15.2: Manto formado mediante técnica de cardado manual.

A16. prototipos formados con PLA/PBS



Figura A16.1: Primeras espumas formadas con el bicomponente PLA/PBS.

A17. Espumas formadas de PLA/PLA



Figura A17.1: Primeras espumas formadas con bicomponente PLA/PLA.

A18. Validación del modelo matemático

Para validar el modelo matemático se trabaja con cambios de temperatura predictivos para cada termocupla con el fin de ajustar el modelo matemático, previo a ingresar datos experimentales, para así evaluar los valores de α , c_p , k , R , R en casos ideales.

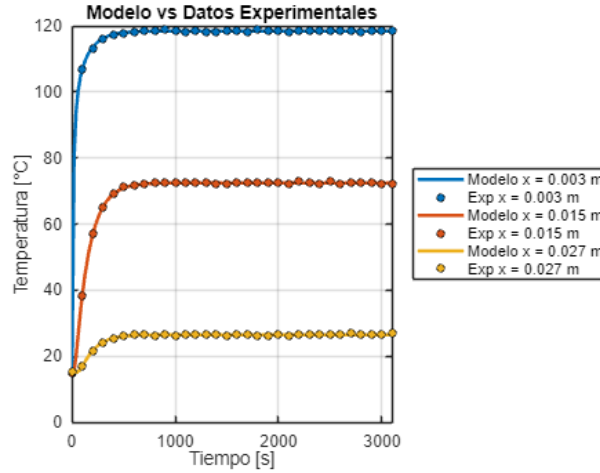


Figura A18.1: Comparación entre datos sintéticos y predicción del modelo transitorio ajustado.

El gráfico A18.1 representa cómo cambia la temperatura del aislante en la posición de las 3 termocuplas con el paso del tiempo, mostrando las líneas como el modelo matemático establecido y puntos como datos a lo largo del tiempo. En este caso los datos son sintéticos, con el fin de ajustarse al modelo.

Se obtienen valores estimados

$$\alpha = 7,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{A.1})$$

$$k = \alpha \rho C_p = 0,0679 \text{ W/mK} \quad (\text{A.2})$$

$$R'' = \frac{B}{k} = 0,442 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (\text{A.3})$$

Resistencia total del panel de área $A = 0,09 \text{ m}^2$

$$R = \frac{B}{kA} = 4,91 \text{ K/W} \quad (\text{A.4})$$

Al despreciar las pérdidas de calor hacia el entorno y las resistencias de contacto entre superficies, se tiende a sobrestimar la difusividad térmica efectiva del sistema. Por tanto, el modelo desarrollado debe interpretarse como una herramienta de ajuste del comportamiento térmico observado, más que como un modelo predictivo absoluto.

Los valores son coherentes con espumas lignocelulósicas de muy baja densidad, debido a que la porosidad contribuye a una disminución significativa de la conductividad térmica (Gibson and

Ashby, 1997).

Al comparar la espuma con valores dentro del rango típico de aislantes livianos ($0,08 < k < 0,03 \text{ W/mK}$) (Long et al., 2018), esta se posiciona en un rango intermedio, sin embargo, al considerar las suposiciones planteadas en la sección 3.4 se infiere que las propiedades térmicas deben mejorar en el ensayo experimental, esto debido a que en el ensayo real sí se tienen pérdidas de calor laterales leves, lo que disminuye la conductividad térmica aparente. Estos valores representan una aproximación inicial del comportamiento térmico del sistema bajo condiciones idealizadas. En el apéndice A22 se muestran los cambios de temperatura en 3D.

A19. Flujo de caja

La evaluación económica del proyecto se desarrolla mediante un flujo de caja descontado, considerando un horizonte de evaluación de 10 años, e incorporando costos de inversión (CAPEX), costos operacionales (OPEX), depreciación lineal de equipos, impuestos e indicadores financieros, tales como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

El análisis se realiza con un enfoque de escalamiento industrial, considerando una producción inicial de 100.000 kg/año de material y un crecimiento progresivo de producción durante los primeros años de operación hasta llegar a los 180.000 kg/año.

A19.1. Supuestos económicos generales

Los principales parámetros utilizados para la evaluación económica se presentan en la Tabla A20.3.

Tabla A19.1: Parámetros económicos utilizados en la evaluación del proyecto.

Parámetro	Valor
Horizonte de evaluación	10 años
Tasa de descuento	12 %
Inflación anual considerada	3 %
Impuesto a la utilidad	27 %
Producción inicial	100.000 kg/año
Precio inicial de venta	4 USD/kg

La tasa de descuento utilizada corresponde a un escenario de riesgo medio para una evaluación preliminar de escalamiento industrial. Asimismo, se consideró un incremento anual del 3 % tanto en costos operacionales como en precio de venta con el objetivo de representar el efecto de inflación durante los años

A19.2. Estimación del CAPEX

La inversión inicial fue estimada considerando equipamiento industrial equivalente al requerido para el procesamiento de fibras vegetales, mezcla de biopolímeros y termofijación del material aislante desarrollado.

Los valores fueron estimados a partir de referencias comerciales de equipos industriales equivalentes utilizados en procesos de tratamiento de fibras, manufactura de biomateriales y procesamiento térmico.

Tabla A19.2: Estimación de inversión inicial (CAPEX).

Equipo	Valor (USD)	Vida útil (años)
Compresores industriales	72.000	15
Máquinas cardadoras	195.000	20
Refinadores	135.000	15
Hornos industriales	255.000	15
Moldes de termofijación	36.000	10
Tamices metálicos	18.000	8
Sistema de ventilación	53.000	15
Obras civiles	35.000	20
Montaje e instalación	50.000	10
Instrumentación	10.320	5
Instalaciones eléctricas	65.000	15
CAPEX total	924.320	-

Los costos asociados a instrumentación consideran balanzas industriales, termocuplas tipo K, higrómetros y sistemas de monitoreo de temperatura y humedad para control ambiental del proceso.

A20. Estimación del OPEX

Los costos operacionales fueron estimados considerando materias primas, consumo energético, mano de obra, mantención y costos auxiliares asociados a una operación piloto-industrial continua.

El costo operacional inicial considerado para el primer año corresponde aproximadamente a 136.000 USD/año.

A20.1. Materias primas

La composición del material desarrollado considera fibras vegetales derivadas de quillay, fibra bicomponente PLA/PBS y bórax como aditivo retardante de llama.

El costo asociado al quillay fue estimado utilizando un valor aproximado de 12 USD/m³ de materia prima vegetal. Debido a que el quillay corresponde a una fracción relativamente económica del material, su contribución al costo total resulta baja en comparación con el biopolímero estructural.

La fibra bicomponente PLA/PBS representa el principal componente económico del material aislante, debido a su función estructural y de termofijación. Los costos asociados fueron estimados considerando referencias comerciales de fibras biopoliméricas industriales utilizadas en aplicaciones textiles y compuestos sustentables.

Por otra parte, el bórax fue incorporado como aditivo retardante de llama debido a los resultados experimentales obtenidos durante los ensayos de inflamabilidad. Su costo fue estimado utilizando valores comerciales industriales para boratos utilizados en aplicaciones químicas y retardantes de llama.

Tabla A20.1: Estimación de costos operacionales anuales iniciales (OPEX).

Concepto	Valor estimado (USD/año)
Quillay	8.000
Fibra PLA/PBS	45.000
Bórax	6.000
Electricidad	18.000
Agua	2.000
Mano de obra	25.000
Mantenimiento	15.000
Transporte	6.000
Climatización	3.000
Reposición moldes/tamices	8.000
OPEX total estimado	136.000

A20.2. Consumo eléctrico

El costo eléctrico fue calculado considerando una tarifa promedio aproximada de 120 CLP/kWh para suministro industrial en Chile. El consumo energético considera la operación continua de hornos de termofijación, refinadores, cardadoras, ventilación y sistemas auxiliares del proceso.

El consumo anual estimado corresponde aproximadamente a 135.000 kWh/año, obteniéndose un costo cercano a 18.000 USD/año.

A20.3. Producción considerada

La producción utilizada en el flujo de caja fue estimada considerando un escenario de escalamiento progresivo piloto-industrial, alcanzando una capacidad máxima de 180.000 kg/año a partir del año

8 de operación. Este enfoque busca representar una etapa inicial de estabilización y optimización del proceso productivo antes de alcanzar capacidad operacional máxima.

Tabla A20.2: Producción anual considerada en el flujo de caja.

Año	Producción (kg/año)
1	100.000
2	110.000
3	121.000
4	133.100
5	146.410
6	161.051
7	177.156
8	180.000
9	180.000
10	180.000

El crecimiento progresivo durante los primeros años fue calculado utilizando un incremento anual aproximado del 10 %, limitado posteriormente a una capacidad máxima de producción de 180.000 kg/año, correspondiente a la capacidad operacional estimada para los equipos industriales considerados.

A20.4. Supuestos económicos generales

Los principales parámetros utilizados en la evaluación económica se presentan en la Tabla A20.3.

Tabla A20.3: Parámetros económicos utilizados en la evaluación del proyecto.

Parámetro	Valor
Horizonte de evaluación	10 años
Tasa de descuento	12 %
Inflación anual considerada	3 %
Impuesto a la utilidad	27 %
Producción inicial	100.000 kg/año
Producción máxima	180.000 kg/año
Precio inicial de venta	4 USD/kg
OPEX inicial	136.000 USD/año

Se consideró un incremento anual del 3 % tanto en costos operacionales como en precio de venta con el objetivo de representar el efecto de inflación promedio durante el horizonte de evaluación económica.

A20.5. Consumo eléctrico

El costo asociado a energía eléctrica fue calculado considerando una tarifa AT 4.3 aproximada de 120 CLP/kWh para suministro industrial en Chile de alta demanda. El consumo energético contempla principalmente la operación de hornos de termofijación, refinadores, cardadoras y sistemas auxiliares de ventilación y control ambiental.

El consumo eléctrico anual fue estimado en aproximadamente 135.000 kWh/año para la producción inicial considerada, obteniéndose un costo cercano a 18.000 USD/año.

Tabla A20.4: Estimación de costos operacionales anuales iniciales (OPEX).

Concepto	Valor estimado (USD/año)
Quillay	8.000
Fibra PLA/PBS	45.000
Bórax	6.000
Electricidad	18.000
Agua	2.000
Mano de obra	25.000
Mantenimiento	15.000
Transporte	6.000
Climatización	3.000
Reposición moldes/tamices	8.000
OPEX total estimado	136.000

El costo asociado al quillay fue estimado considerando valores aproximados de materia prima vegetal disponibles para aplicaciones industriales. Por otra parte, la fibra bicomponente PLA/PBS representa el principal componente económico del proceso debido a su función estructural y de termofijación dentro del material aislante desarrollado.

Asimismo, el bórax fue incorporado como aditivo retardante de llama debido a los resultados experimentales obtenidos durante los ensayos de inflamabilidad, donde se observó una reducción significativa de ignición del material.

A20.6. Indicadores económicos

La viabilidad económica preliminar del proyecto fue evaluada mediante el cálculo de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).

Tabla A20.5: Indicadores económicos obtenidos para el proyecto propuesto.

Indicador	Valor
VAN	1.188.683 USD
TIR	31,68 %
Payback estimado	5 años

Los resultados obtenidos sugieren la viabilidad económica preliminar para una eventual implementación piloto-industrial del proceso propuesto. El VAN positivo y una TIR superior a la tasa de descuento utilizada indican que el proyecto presenta potencial económico favorable bajo las condiciones consideradas.

Finalmente, cabe destacar que el presente análisis corresponde a una estimación técnico-económica preliminar y no incorpora aún optimización avanzada de proceso, economías de escala ni validación industrial completa.

A20.7. Comparación económica preliminar con aislantes comerciales

Con el fin de contextualizar económicamente el material desarrollado, se realiza una comparación preliminar entre el costo estimado de producción de la espuma aislante basada en *Quillaja saponaria* y distintos aislantes térmicos comerciales como el EPS, XPS, PUR, lana mineral, etc. Además, se comparan las densidades típicas de cada material debido a su influencia directa sobre propiedades térmicas.

El costo estimado de la espuma desarrollada corresponde aproximadamente a 4 USD/kg, valor obtenido a partir del análisis económico preliminar realizado en esta memoria considerando materias primas, consumo energético y costos operacionales asociados al proceso experimental.

Tabla A20.6: Comparación preliminar entre aislantes térmicos comerciales y la espuma desarrollada a partir de Quillay.

Material aislante	Costo [USD/kg]	Densidad típica [kg/m ³]	Referencia
Espuma Quillay– PLA/PBS (este trabajo)	4,0	64–77	-
Poliestireno expandido (EPS)	2,0–4,5	10–35	(ast, 2023; EUMEPS, 2023)
Poliestireno extruido (XPS)	4,0–7,0	25–45	(Kingspan Group, 2023)
Poliuretano rígido (PUR/PIR)	5,0–10,0	30–60	(Huntsman Corporation, 2022)
Lana mineral	1,5–4,0	30–200	(Rockwool International, 2023)
Celulosa insuflada	1,0–3,0	25–65	(Greenfiber, 2023)
Fibra de madera	3,0–8,0	50–250	(Pavatex, 2023)

Los resultados muestran que la espuma aislante desarrollada presenta un costo por kilogramo comparable al de aislantes térmicos comerciales de mayor valor agregado, como XPS, PUR y paneles de fibra de madera. Además, su densidad se encuentra dentro del rango típico de materiales lignocelulósicos livianos y aislantes poliméricos convencionales.

A diferencia de materiales derivados completamente del petróleo, la espuma desarrollada utiliza residuos provenientes de la extracción de saponinas de *Quillaja saponaria*, lo que podría representar ventajas ambientales asociadas a biodegradabilidad, valorización de residuos forestales y reducción de huella de carbono.

Si bien esta comparación corresponde a una estimación preliminar y los valores comerciales dependen de escala de producción y mercado, los resultados sugieren que el material desarrollado posee potencial competitivo desde un punto de vista técnico y económico frente a alternativas aislantes convencionales.

A21. Ampliación del cálculo del modelo matemático

El siguiente desarrollo corresponde a la formulación teórica del modelo utilizado en la sección 3.3, ampliando el cálculo de la ley de Fourier para conducción en 1 dimensión de placa plana. Esto representa la espuma aislante en el montaje experimental.

Ley de Fourier (conducción 1D):

$$q_x(x, t) = -k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{A.5})$$

Balance de materia:

$$q_x(x, t) A - q_x(x + dx, t) A = \rho C_p A dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{A.6})$$

$$\Rightarrow q_x(x, t) - q_x(x + dx, t) = \rho C_p dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{A.7})$$

Expansión de Taylor en: $q_x(x + dx, t)$

$$q_x(x + dx, t) \approx q_x(x, t) + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (\text{A.8})$$

$$q_x(x, t) - \left(q_x(x, t) + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) = \rho C_p dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{A.9})$$

$$\Rightarrow -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx = \rho C_p dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{A.10})$$

Usando $q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}$:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(-k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{A.11})$$

Si k es constante:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{A.12})$$

Se define:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\alpha \rightarrow \text{D.T} \quad k \rightarrow \text{C.T}) \quad (\text{A.13})$$

Planteamiento del problema (B = espesor):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq B \quad (\text{A.14})$$

C.I. ($t = 0$):

$$T(x, 0) = T_a, \quad 0 \leq x \leq B \quad (\text{A.15})$$

C.F.1 (t > 0):

$$T(0, t) = T_p \quad (\text{A.16})$$

C.F.2 (t > 0):

$$T(B, t) = T_a \quad (\text{A.17})$$

Adimensionalización:

$$\theta = \frac{T - T_a}{T_p - T_a}, \quad \eta = \frac{x}{B}, \quad \tau = \frac{\alpha t}{B^2} \quad (\text{A.18})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2}, \quad 0 \leq \eta \leq 1 \quad (\text{A.19})$$

Condiciones adimensionales:

$$\text{C.I. (t = 0): } \theta(\eta, 0) = 0 \quad (\text{A.20})$$

$$\text{C.F.1: } \theta(0, \tau) = 1 \quad (\text{A.21})$$

$$\text{C.F.2: } \theta(1, \tau) = 0 \quad (\text{A.22})$$

Separación de variables (Parte Estacionaria):

$$\frac{d^2 \theta_s}{d\eta^2} = 0, \quad \theta_s(0) = 1, \quad \theta_s(1) = 0 \quad (\text{A.23})$$

Integrando dos veces

$$\theta_s(\eta) = A\eta + C \quad (A \rightarrow \text{Pendiente}, C \rightarrow \text{Cte}) \quad (\text{A.24})$$

$$\theta_s(0) = 1 \Rightarrow C = 1 \quad (\text{A.25})$$

$$\theta_s(1) = 0 \Rightarrow A = -1 \quad (\text{A.26})$$

$$\Rightarrow \theta_s(\eta) = 1 - \eta \quad (\text{A.27})$$

Se define:

$$u(\eta, \tau) = \theta(\eta, \tau) - \theta_s(\eta) \quad (\text{A.28})$$

u cumple:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \quad (\text{A.29})$$

C.F. homogéneas:

$$u(0, \tau) = 0, \quad u(1, \tau) = 0 \quad (\text{A.30})$$

C.I.:

$$u(\eta, 0) = \theta(\eta, 0) - \theta_s(\eta) = 0 - (1 - \eta) = \eta - 1 \quad (\text{A.31})$$

Separación de variables para $u(\eta, \tau)$:

$$u(\eta, \tau) = X(\eta) T(\tau) \quad (\text{A.32})$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = X(\eta) T'(\tau) \quad (\text{A.33})$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} = X''(\eta) T(\tau) \quad (\text{A.34})$$

$$X(\eta) T'(\tau) = X''(\eta) T(\tau) \quad (\text{A.35})$$

Al dividir por $X(\eta)T(\tau)$:

$$\frac{T'(\tau)}{T(\tau)} = \frac{X''(\eta)}{X(\eta)} = -\lambda \quad (\text{A.36})$$

(Al ser dependiente uno de τ y el otro de η , ambos son constantes.)

Temporal:

$$T'(\tau) + \lambda T(\tau) = 0 \quad \Rightarrow \quad T(\tau) = e^{-\lambda \tau} \quad (\text{A.37})$$

Espacial:

$$X''(\eta) + \lambda X(\eta) = 0 \quad (\text{A.38})$$

A) $X(\eta)$:

$$u(0, \tau) = 0 \Rightarrow X(0) = 0 \quad (\text{A.39})$$

$$u(1, \tau) = 0 \Rightarrow X(1) = 0 \quad (\text{A.40})$$

Problema de autovalores tipo Sturm–Liouville:

$$X'' + \lambda X = 0, \quad X(0) = 0, \quad X(1) = 0 \quad (\text{A.41})$$

Con $\lambda = \mu^2$ (y $\lambda > 0$):

$$X(\eta) = C_1 \cos(\mu\eta) + C_2 \sin(\mu\eta) \quad (\text{A.42})$$

$$X(0) = 0 \Rightarrow C_1 = 0 \Rightarrow X(\eta) = C_2 \sin(\mu\eta) \quad (\text{A.43})$$

$$X(1) = 0 \Rightarrow C_2 \sin(\mu) = 0 \quad (\text{A.44})$$

Para solución no trivial: $\sin(\mu) = 0 \Rightarrow \mu = n\pi$.

$$\lambda_n = (n\pi)^2, \quad X_n(\eta) = \sin(n\pi\eta) \quad (\text{A.45})$$

(Esto satisface los contornos 0.)

Parte temporal:

$$T_n(\tau) = e^{-\lambda_n \tau} = e^{-n^2 \pi^2 \tau} \quad (\text{A.46})$$

Se reemplaza:

$$u_n(\eta, \tau) = X_n(\eta) T_n(\tau) = \sin(n\pi\eta) e^{-n^2 \pi^2 \tau} \quad (\text{A.47})$$

Por linealidad y usando $u(\eta, 0) = \eta - 1$:

$$u(\eta, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\pi\eta) e^{-n^2 \pi^2 \tau} \quad (\text{A.48})$$

Los coeficientes se obtienen con la C.I.:

$$u(\eta, 0) = \eta - 1 = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\pi\eta) \quad (\text{Seno rango en Fourier, } 0 < \eta < 1) \quad (\text{A.49})$$

$$b_n = 2 \int_0^1 (\eta - 1) \sin(n\pi\eta) d\eta = -\frac{2}{n\pi} \quad (\text{A.50})$$

Finalmente:

$$\theta(\eta, \tau) = \theta_s(\eta) + u(\eta, \tau) = 1 - \eta - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin(n\pi\eta) e^{-n^2\pi^2\tau} \quad (\text{A.51})$$

A22. Modelo matemático en 3D

Aquí se da una vista más amplia del comportamiento del modelo matemático

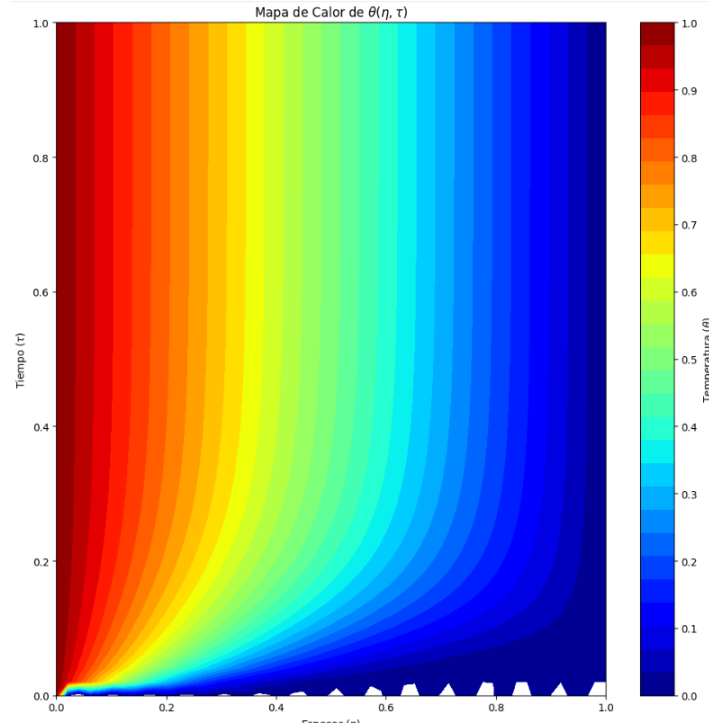


Figura A22.1: Mapa de calor a distintas posiciones en el espesor.

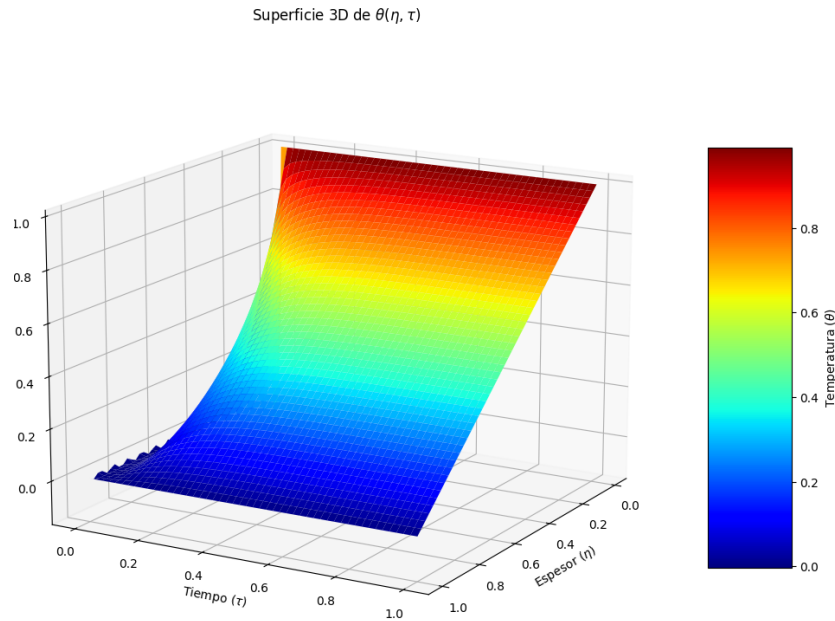


Figura A22.2: Gráfica 3D respecto al modelo matemático planteado.

Los gráficos 3D representan el comportamiento de la temperatura en distintas posiciones del espesor a través del tiempo. Esto entrega una predicción para cualquier posición del espesor en la espuma aislante. Mostrando el análisis en diferentes ángulos del plano (x,y,z)

A23. Resumen general

Tabla A23.1: Resumen de caracterización experimental del prototipo final de espuma aislante.

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad	Observación / condición
Fracciones granulométricas seleccionadas	–	1–3	–	Rango asociado: 0,28–1,00 mm (se descarta fracción 4: < 0,28 mm).
Contenido de fibra bicomponente	$w_{\text{PLA/PBS}}$	13	% m/m	Proporción óptima del prototipo final.
Método de mezclado	–	–	–	Inyección de aire en suspensión y filtrado (mezcla más homogénea).
Termofijación	$T_{\text{tf}}, t_{\text{tf}}$	170; 10	°C; min	Condición que entregó mejor estabilidad mecánica (no deformación relevante).
Espesor del panel	B	0,05	m	Espesor usado en la estimación de propiedades térmicas.
Área efectiva del panel	A	0,09	m ²	–
Densidad aparente	ρ	50,67	kg/m ³	–
Calor específico (adoptado)	C_p	1500	J/(kg·K)	Valor utilizado en el ajuste del modelo transitorio.
Difusividad térmica	α	$7,0 \times 10^{-8}$	m ² /s	Estimación desde ajuste del modelo transitorio.
Conductividad térmica	k	0,0061	W/(m·K)	Calculada como $k = \rho C_p \alpha$.
Resistencia térmica areal	R''	8,27	m ² K/W	$R'' = B/k$.
Resistencia térmica global	R	91,07	K/W	$R = B/(kA) = R''/A$.
Tratamiento ignífugo (bórax anhidro)	–	5	% m/m	Solución acuosa al 5 % aplicada por atomizador. Se usó 5 mL para 3 g de espuma ($w_{\text{bórax}} \approx 8,3\%$ m/m).