



Universidad de Concepción



EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN DEL PANEL AISLANTE FLEXIBLE
OBTENIDO A PARTIR DE LA CORTEZA DE EUCALYPTUS
SP. PARA SU APLICACIÓN EN EL SECTOR RESIDENCIAL
EN CHILE

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniera Ambiental

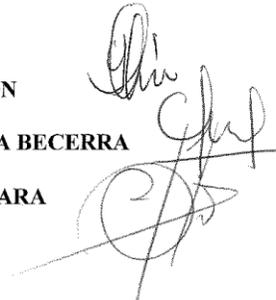
KAREN DAZA SALGADO

Profesora Guía: Yannay Casas Ledón
Profesora Co-Guía: Cecilia Fuentealba

Concepción, Chile
2019

**“Evaluación ambiental del proceso de fabricación del panel aislante flexible
obtenido a partir de la corteza de Eucalyptus sp. para su aplicación en el
sector residencial en Chile”.**

PROFESOR GUÍA: Dra. YANNAY CASAS LEDÓN
PROFESOR CO-GUÍA: Dra. CECILIA FUENTEALBA BECERRA
PROFESOR COMISIÓN: Dr. RICARDO FIGUEROA JARA



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, abril 2019



100 AÑOS
DE
DESARROLLO
LIBRE DEL
ESPIRITU

Agradecimientos:

Quiero comenzar agradeciendo todo la ayuda que recibí por parte de mi familia, amigos de la universidad y de baile, compañeros, profesores, trabajadores del EULA y trabajadores de la UDT. Sin duda, cada granito de arena que me brindaron ayuda para mi formación y les deseo a cada uno que dios bendiga siempre sus vidas.

Quiero destacar principalmente a:

Mis padres por ser mi pilar fundamental, al entregarme todas las herramientas necesarias para afrontar esta etapa. Es por esta razón que me siento eternamente agradecida por todos los esfuerzos y sacrificios que han realizado durante toda mi vida. Me han entregado la posibilidad de tener una familia y disfrutar de mis abuelitos que a pesar de que no estuvieron físicamente durante esta etapa, permanecen vivos en cada recuerdo o enseñanza.

Quiero destacar el amor incondicional, la confianza y la fe que me entrego mi hermano ya que fue quien me dio fuerzas en momentos difíciles. Estoy eternamente agradecida de la generosidad que recibí cada vez que lo necesite, espero que nunca olvide lo mucho que lo admiro y que la hermandad ha sido una de las maravillas que he podido disfrutar.

Mis amigos que fui conociendo con el tiempo y sin darnos cuentas comenzamos a crecer juntos. Me siento muy orgullosa de cada amigo, por todo el esfuerzo que han colocado y espero que todos pronto reciban el fruto de todos sus sacrificios. Mis amigos que han permanecido del colegio, amigos del baile, amigos universitarios muchas gracias por confiar en mí y abrir sus corazones.

Mi profesora guía Yannay Casas Ledon ha sido una de los milagros que me entrego la vida y jamás olvidare todo su apoyo. La admiro por su espíritu guerrero, disciplina, proactividad, energía e integralidad. Agradezco toda su ayuda, criticas, palabras, consejos y escucharme durante la etapa final. Espero que siga recibiendo bendiciones junto a toda su familia.

Gracias dios por esta oportunidad y jamás quiero olvidar que “El amor es la más grande revolución”.

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Pregunta de Investigación	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Demanda energética mundial.....	4
2.2. Demanda de energía en el sector residencial en el mundo	5
2.3. Demanda energética nacional	6
2.4. Demanda energética del sector residencial por tipo de energético.....	7
2.5. Demanda energética del sector residencial en la región del Biobío	9
2.6. Reglamentación térmica chilena.....	10
2.7. Balance energético en una vivienda	13
2.8. Tipos de aislantes térmicos	15
2.9. Disponibilidad de biomasa en la región del Biobío.....	19
2.10. Análisis de Ciclo de vida (ACV)	20
2.11. Aplicaciones del ACV en el sector construcción	21
3. METODOLOGÍA.....	23
3.1. Objetivo 1: Estudiar los procesos de fabricación.	24
3.1.1. Descripción del proceso de fabricación del panel aislante	24
3.1.2. Caracterización del panel aislante.....	27
3.1.3. Cuantificar las entradas y salidas del proceso de fabricación.....	29
3.2. Objetivo 2: Evaluar los impactos ambientales.....	29
3.2.1. Objetivos y alcance.....	30
3.2.2. Unidad Funcional (UF).....	31
3.2.3. Límites del sistema	32
3.2.4. Asignación de cargas.....	38
3.2.5. Inventario del ciclo de vida (ICV).....	38
3.2.6. Evaluación de impacto	40
3.2.7. Interpretación.....	40
3.3. Objetivo 3: Análisis Comparativo	40
3.3.1. Comparar ambientalmente el mejor escenario con diferentes paneles tradicionales	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42

4.1. Evaluación técnica del proceso de fabricación del panel aislante	42
4.2. Estudio del procesos de fabricación del panel aislante	43
4.3. Evaluación del ciclo de vida de la fabricación del panel aislante.....	48
4.4. Análisis comparativo entre diferentes aislantes térmicos	53
5. CONCLUSIONES	56
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
7. ANEXOS	
Anexo 1	65
Anexo 2	66
1. Resistencia al avance de la llama	66
1.1. Metodología: “Resistencia al avance de la llama”	66
2. Espesor	69
3. Difusividad térmica.....	70
4. Calor específico (Ce)	70
5. Densidad	71
6. Conductividad térmica (λ)	71
6.1. Metodología Conductividad térmica	72
7. Resistencia térmica, R100	73
8. Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua (μ)	73
8.1. Metodología Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua (μ)	74
9. Resistencia a mohos.....	76

Índice figuras

Ilustración 1: Consumo energético total por sector en Chile, expresado en TCal.	7
Ilustración 2: Contribución de los energéticos en el consumo total del sector residencial en Chile.	8
Ilustración 3: Distribución de los principales usos de energéticos en el sector residencial en Chile.	8
Ilustración 4: Tipos de combustible usados en calefactores, en el sector residencial de Chile.....	9
Ilustración 5: Distribución de consumo final por sector para la región del Biobío.	10
Ilustración 6: Demanda de energía en calefacción promedio nacional (kwh/m ² *año). RT: Reglamento Térmico contenido en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción.....	12
Ilustración 7: Balance Térmico de una vivienda.....	15
Ilustración 8: Conductividad Térmica de paneles aislantes con diferentes materias primas.....	17
Ilustración 9: Requerimientos de energía para diferentes materiales aislantes.	18
Ilustración 10: Resumen Metodológico para cada objetivo específico.	23
Ilustración 11: Diagrama de Bloque del proceso de fabricación de panel aislante térmico a partir de corteza de eucalipto.....	24
Ilustración 12: Las fases de un ACV y aplicaciones directas.....	30
Ilustración 13: Límites del sistema de la cuna a la puerta de la fabricación de panel aislante térmico de corteza de Eucalyptus s.p.....	33
Ilustración 14: Localización de las principales plantas de astillado y la ubicación actual de la planta de panel aislante	37
Ilustración 15: Comparación ambiental entre los paneles aislantes con diferentes densidades. Método: CML-IA baseline V3.02 / World 2000/Caracterización.....	47
Ilustración 16: Análisis de la contribución de cada etapa del ciclo de vida del panel aislante de 25 kg/m ³ con flujo de referencia igual a 1,13 kg y Metodo CML-IA baseline V3.02/World 200/Caracterización.	49
Ilustración 17: Energía consumida expresada en términos de MJ eq por fu para diferentes paneles aislantes.....	54
Ilustración 18: Potencial de calentamiento global expresado kg CO ₂ eq por fu para diferentes aislantes.....	55

Índice tablas

Tabla 1: Técnicas para medir las propiedades del panel aislante.....	28
Tabla 2: Exigencias mínimas de resistencia térmica multiplicado por 100 (R100) de un material aislante incorporado al complejo de muro, según zona térmica (NCh 2251).....	31
Tabla 3: Límites geográficos de las materias primas del proceso de producción.....	36
Tabla 4: Sistem Foreground y barckground.	39
Tabla 5: Cantidad de masa de panel aislante para cada material requerida para la UF de 1 m ² K/W.	41
Tabla 6: Especificación técnica de paneles aislantes flexibles.	43
Tabla 7: Requerimiento eléctrico de los principales equipos involucrados en la fabricación del panel de 25 kg/m ³	44
Tabla 8: Requerimientos de energía térmica de los principales equipos.	45
Tabla 9: . Perfil ambiental de los cuatro escenarios compuesto por paneles de 25, 50, 75 y 100 kg/m ³	48



RESUMEN

Una de las razones que contribuyen a los altos consumos energéticos en el sector de la construcción en Chile se debe principalmente al deficiente aislamiento térmico. Lo cual trae consigo un incremento considerable en los consumos energéticos y las emisiones gases efecto invernadero. En este sentido, la búsqueda de nuevos materiales aislantes competitivos con los tradicionales y con mayores beneficios ambientales constituye uno de los desafíos en este sector. Actualmente, en el mercado de los materiales aislantes predominan los materiales sintéticos e inorgánicos. Sin embargo, se ha incrementado el interés por las investigaciones en materiales con fibras naturales tales como cáñamo, kenaf, cáscara de arroz, corteza de eucalipto. En particular la corteza de eucalipto se convierte en una alternativa prometedora en Chile debido a su disponibilidad y sus competitivas propiedades térmicas. Sin embargo, aún no se conoce los impactos ambientales asociados a la producción de dicho paneles en comparación con los tradicionales y otros de origen natural. En función de esto, el objetivo de este trabajo es evaluar los impactos ambientales de un nuevo panel aislante flexible fabricado a partir de un residuo forestal "Corteza de Eucalyptus sp." para su aplicación en el sector de la construcción. Primeramente, se estudió el proceso de fabricación a escala piloto, determinando las propiedades (térmicas, resistencia al fuego y permeabilidad al vapor de agua) del panel obtenido. Además, se midieron los consumos de materiales (aditivos, materias primas) y energéticos requeridos en la fabricación del panel. Posteriormente se determinaron los impactos ambientales del proceso de fabricación considerando desde la cuna a la puerta, considerando desde la etapa de cultivo de rotación corta, astillado, transporte y fabricación del panel. Para ello, se basaron en las directrices de los estándares internacionales ISO 14040 sobre el análisis de ciclo de vida (ACV). En este caso se compararon cuatro alternativas de panel aislante con diferentes densidades (25, 50, 75 y 100 kg/m³), para los cuales se usaron la unidad funcional de R = 1 m²K/W. Finalmente, se compararon los paneles de corteza de eucalipto con aislantes tradicionales y reportados en la literatura usando las categorías de impacto consumo de energía y calentamiento global.

Los resultados mostraron que el panel aislante con corteza de Eucalyptus sp. con densidad de 25 kg/m^3 presentó el menor impacto ambiental para todas las categorías evaluadas en comparación con el resto de los paneles (50 , 75 y 100 kg/m^3). Para todas las variantes contribuciones durante todo el ciclo de vida son la etapa de fabricación del panel, cosecha y transporte. Los impactos asociados a la fabricación de panel se deben a principalmente a la producción de la fibra bi-componentes, aditivos y extracción del combustible (gas natural). En cambio, para la silvicultura se debe a la producción de fertilizantes y pesticidas. Por otra parte, el panel usando corteza de eucalipto constituye una alternativa factible desde el punto de vista ambiental para aplicaciones sustentables en el sector de la construcción debido a que presentan valores competitivos en términos de consumos energéticos y emisiones de carbono que los paneles no tradicionales (1.1 - $5.8 \text{ kgCO}_2\text{eq/u.f.}$ y 25 - 258 MJ/u.f.).



1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las políticas energéticas y medioambientales asociadas al sector de la construcción se están centrando en la reducción de los consumos energéticos y la minimización de los impactos ambientales (Blengini & Di Carlo, 2010; Hollberg & Ruth, 2016). Esto, para lograr que la temperatura promedio mundial se mantenga bajo los 2 °C según el acuerdo de París y se eviten los daños irreparables del cambio climático (Dong, Dong, Jiang, Dong, & Liu, 2018); Dovie, 2019) Según una estimación realizada por el programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA) los edificios consumen un 40% de la energía mundial y son responsables de 1/3 de las emisiones de gases efecto invernadero (Asdrubali, D'Alessandro, & Schiavoni, 2015). La etapa de operación de un edificio, presenta el mayor consumo de energía considerando todo el ciclo de vida de un edificio y el mayor porcentaje de esta energía se destina a la calefacción/refrigeración para alcanzar un confort térmico. Las deficiencias constructivas de un vivienda en términos de envoltura térmica que generan grandes pérdidas o ganancias de energía (Ricciardi, Belloni, & Cotana, 2014).

En este contexto, el método más eficiente para solucionar el problema planteado es la instalación de aislantes térmicos en toda la envoltura de un edificio ya que permiten reducir pérdidas y ganancias de energías. De esta manera, los habitantes alcanzan un confort térmico, reducen los consumos de energía y emisiones de gases efecto invernadero(Ricciardi et al., 2014). Las eficiencias energéticas en las nuevas edificaciones (Olivieri *et al.*, 2017; Leth-Petersen and Togeby, 2001) y el reacondicionamiento térmico de las viviendas existentes se plantean como objetivos dentro de cada país y constituyen una alternativa para la sustentabilidad de dicho sector. En este sentido, las investigaciones se han centrado en el desarrollo de paneles aislantes innovadores a partir de fibras naturales y/o materiales reciclados. El enfoque hacia estos nuevos materiales aislantes, es que son más sustentables que los materiales que se encuentran en el mercado, ya que generan menores impactos ambientales y a la salud de las personas. Otras ventajas son el costo decreciente de materias primas y/o procesamiento; la materia prima de origen

renovable y biodegradable (en su disposición final); se reduce la dependencia de materias primas fósiles y presentan buenos rendimientos térmicos y acústicos (Huang, Sun and Musso, 2018; Rodríguez, 2015; Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014). Las fibras provenientes de corteza de Eucalipto (*Eucalyptus*) constituyen una alternativa prometedora para Chile, primeramente permite valorizar un residuo derivado de la industria forestal y contribuye a establecer diferencias

En Chile, las plantaciones de eucalipto corresponden a 774.000 ha (32%) resultando ser la segunda especie con mayor superficie plantada y la primera especie es el Pino (*Pinus*) representada con un 58,4% (González *et al.*, 2017; INFOR, 2016). La región del Biobío está representado con un 8.933.000 m³ ssc del total la especie de eucalipto (74%) y pino (52%) constituyen las principales especies comerciales en la industria forestal en Chile, para obtener como producto principal la obtención de madera y pulpa. Sin embargo, los procesos de transformación de estas materias primas generan diferentes subproductos, entre ellos, las cortezas. En el caso de la corteza de pino radiata, su poder calorífico y morfología la hacen bastante utilizada como combustible, en cambio la corteza de eucalipto posee un menor poder calorífico, su morfología fibrosa no es muy adecuada a los sistemas de transporte en calderas, constituyendo un subproducto menos apetecido como material de combustión. Esto produce acumulaciones de este subproducto con potenciales riesgos de incendios. Se estima que en Chile se generan alrededor de 1.319.154 m³, de las cuales más de un 50% es desaprovechado (Fondef ID14i20081, C. Fuentealba).

La valorización de la corteza de eucalipto es una oportunidad de entregar un valor agregado a este material que actualmente es un subproducto que genera costos adicionales por su disposición una materia prima de valor económico, utilizada para generar energía. En este contexto, dada la morfología única del eucalipto y su gran potencial como fuente de fibras vegetales, éstas pueden ser una materia prima idónea para la producción de paneles de fibras con propiedades de aislación térmica, lo cual se desarrolla en un proyecto de investigación de la Universidad de Concepción (Fondef ID14i20081, C. Fuentealba). Esta investigación evaluará

ambientalmente la fabricación de un nuevo panel aislante térmico derivado de fibras de corteza de eucalipto s.p. durante todo su ciclo de vida para comprobar sus beneficios ambientales al compararlos con otros aislantes térmicos convencionales existentes en el mercado.

1.1. Pregunta de Investigación

¿Cuáles son los impactos ambientales asociados a la fabricación del panel aislante de corteza de *Eucalyptus s.p.*, durante todo su ciclo de vida para su aplicación en el sector residencial en Chile?

1.1.1. Objetivo General

Evaluar los impactos ambientales asociados a la fabricación de un panel aislante con fibra de corteza de *Eucalyptus s.p.*, durante todo su ciclo de vida.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. Estudiar el proceso de fabricación de un panel aislante térmico flexible con corteza de *Eucalyptus s.p.*
2. Evaluar los impactos ambientales durante el ciclo de vida de la fabricación del panel aislante térmico usando diferentes densidades másicas.
3. Comparar los beneficios ambientales de la producción del panel propuesto con materiales tradicionales y no tradicionales aplicados en el sector residencial.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Demanda energética mundial

La energía es esencial para una sociedad moderna, ya que permite el funcionamiento de las actividades socioeconómicas y mejoran la calidad de vida (Pastén, 2012). Según las publicaciones realizadas por la Agencia internacional de la energía (EIA) el consumo de energía mundial se han duplicado durante el periodo de 2010 y 2040 (Energía, 2015; Allouhi et al., 2015). En cuanto a las proyecciones futuras, el consumo mundial de la energía aumentara en un 56% entre 2010 y 2040 (Allouhi et al., 2015) . Actualmente, se estimó que la demanda mundial de energía incremento en un 2,2% en el 2017 que es más del doble que el año anterior y el nivel más alto desde el año 2013. Además, se destaca que en el año 2017 se alcanzaron 14.050 millones de toneladas de petróleo equivalente (Mtoe) a diferencia de 10.035 Mtoe en el 2000 (IEA, 2017).

Los factores que incrementan el consumo de energía primaria es el crecimiento económico y demográfico (Aditya et al., 2017). Se pueden incluir otros factores tales como: urbanización y el desarrollo del sector de la construcción (Ahmad, Zhao, & Li, 2019). Estos factores generan un aumento en la demanda energética de los siguientes sectores: industrial (29%), residencial (27%) y transporte (33%) y comercial (8%) (Nejat, Jomehzadeh, Mahdi, & Gohari, 2015). Las fuentes energéticas provienen principalmente de fuentes no renovables ya que se utiliza un 85% de combustibles fósiles, es decir, petróleo (34%), carbón (27%) y gas (23%). El mix energético restante está compuesto por un 6,8% de energía hidroeléctrica, de un 4,41% de energía nuclear y un 3,6% de energías renovables que sumado representan un 15% del total (AIE 2017). Es importante mencionar, que las fuentes no renovable contribuyen significativamente en las emisiones de gases efecto invernadero generando como consecuencia un incremento del calentamiento global, cambio climático y riesgos a la salud de las personas (Ong, Mahlia, & Masjuki, 2011; Oh & Chua, 2010; Pablo-romero, Pozo-barajas, & Yñiguez, 2017)

En síntesis, la energía que es la principal fuente de emisiones de GEI globales (80%) (Nathali, Khan, & Han, 2018). Por lo tanto, un incremento de los consumos de energía genera un aumento de emisiones (Radhi, 2009). La implementación de eficiencia energética, conservación de la energía y energías renovables en sectores altamente energéticos, es una solución en políticas ambientales y energéticas (Guo & Chatellier, 2019). De esta manera se puede cumplir con el Acuerdo de la Conferencia Climática de Paris (COP21) y mantener el aumento de la temperatura media por debajo de los 2 °C (Dong, Dong, Jiang, Dong, & Liu, 2018; Dovie, 2019)

2.2. Demanda de energía en el sector residencial en el mundo

El sector residencial se ha convertido en un tema a debatir en las agendas internacionales y nacionales debido su alto consumo de energía y emisiones globales de CO₂. Por lo tanto, es un sector clave para reducir de manera rápida las emisiones globales (Pablo-romero et al., 2017). El consumo de energía mundial en este sector varía entre un 16% y 50% (Swan & Ugursal, 2009); (Saidur, Masjuki, & Jamaluddin, 2007; Salari & Javid, 2016) con un promedio de 30% hasta un 40% del toda la energía de uso final. Genera aproximadamente 1/3 de las emisiones globales de CO₂ (Asdrubali et al., 2015; Droutsa, Kontoyiannidis, Dascalaki, & Balaras, 2014; Nejat et al., 2015). Se excluye el transporte residencial (Salari & Javid, 2016).

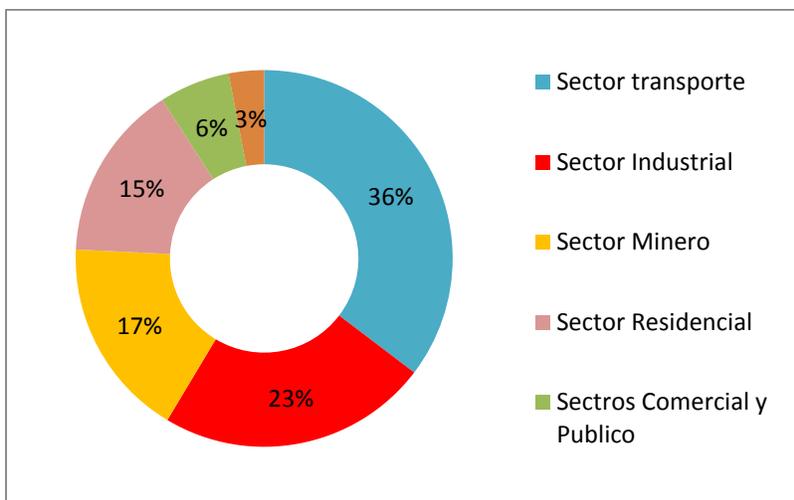
El consumo de energía se destina para alcanzar un confort térmico o un ambiente interior adecuado mediante la utilización de artefactos de calefacción y refrigeración (Isaac & van Vuuren, 2009). El consumo de energía puede variar ya que depende de las decisiones individuales de cada hogar y, además, de los cambios de la temperatura producto del cambio climático (Li, Yang, & Long, 2018). Se proyecta un incremento de las temperaturas generando mayores necesidades de acondicionamiento térmico, que al utilizar netamente electricidad genera un factor de emisión más alto. El nivel de ingreso es un factor que dificulta la utilización de los equipos de aire acondicionado (Isaac & van Vuuren, 2009). Por lo tanto, los factores que generan variaciones en el consumo de energía son: condiciones climáticas (Temperatura del aire exterior, radiación solar, velocidad del viento etc.); características constructivas del edificios (tipo, área, orientación, etc.);

características del usuario; servicios y sistemas del edificio (refrigeración/calefacción de espacios, suministro de agua caliente, etc.); características socio-económicas (grado de educación, costos de energía, etc.); comportamiento del ocupante y por último requerimiento de calidad ambiental al interior (Salari & Javid, 2016; Salari & Javid, 2016; Yu, Fung, Haghghat, Yoshino, & Morofsky, 2011; Yu et al., 2011; Leroy & Yannou, 2018; Santamouris et al., 2007; Yohanis, Mondol, Wright, & Norton, 2008)

El rendimiento energético de un edificio se puede mejorar implementando eficiencia energética en las características físicas de la vivienda. Esto se debe a existen pérdidas y ganancia energía a través de la envolvente térmica. Una cifra importante es que $\frac{3}{4}$ del consumo de energía total del sector residencial presenta un gran potencial para mejorar (Yohanis et al., 2008) y reducir emisiones de GEI ya que existen millones de edificios antiguos que se encuentran con un bajo rendimiento a diferencia de otros sectores emisoras (Droutsa et al., 2014)

2.3. Demanda energética nacional

En el contexto chileno, el consumo final de energía para el año 2018 alcanzó un total de 288.901 teracalorías (Tcal). Los principales energéticos usados a nivel nacional lo constituyen: combustibles derivados del petróleo (57,8%), electricidad (21,4%), biomasa (13%), gas natural (6,3%) y carbón (0,8%) (CCE, 2016). Esta energía se destina a los sectores consumidores de la economía nacional tales como: sector transporte, sector minero, sector residencial, sector comercial y público, sector energético: autoconsumo. Según la Figura 1, el cuarto sector que presenta mayor consumo final de energía es el “*Sector Residencial*” con un 15% en el año 2016, seguido de los sectores transporte (36%), industria (23%) y el sector minero (17%) (“Anuario Estadístico de Energía”, 2016).



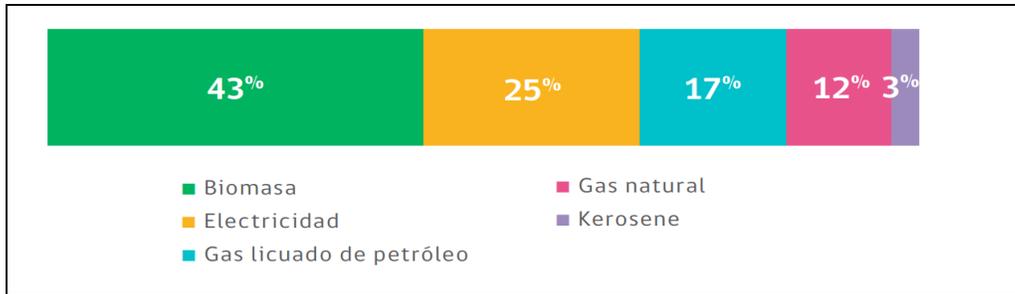
Figuras 1

Ilustración 1: Consumo energético total por sector en Chile, expresado en TCal.

Fuente: ("Anuario Estadístico de Energía", 2016)

2.4. Demanda energética del sector residencial por tipo de energético

El consumo final de energía del sector residencial a nivel nacional alcanzó los 40.945 Tcal, representando el 15% para el año 2015 como se ha mencionado anteriormente. Las principales fuentes de energía que componen el consumo final en este sector son: biomasa (43%), electricidad (25%) y gas licuado de petróleo (17%) como se muestra en la Figura 2 ('Anuario Estadístico de Energía', 2016)). El uso de biomasa que en gran porcentaje corresponde a leña se utiliza principalmente para fines de calefacción. Los altos porcentajes de consumos se deben principalmente a la amplia disponibilidad de la leña en la zona centro y sur de Chile. Además, actualmente la leña es el combustible más competitivo en el mercado de los combustibles.

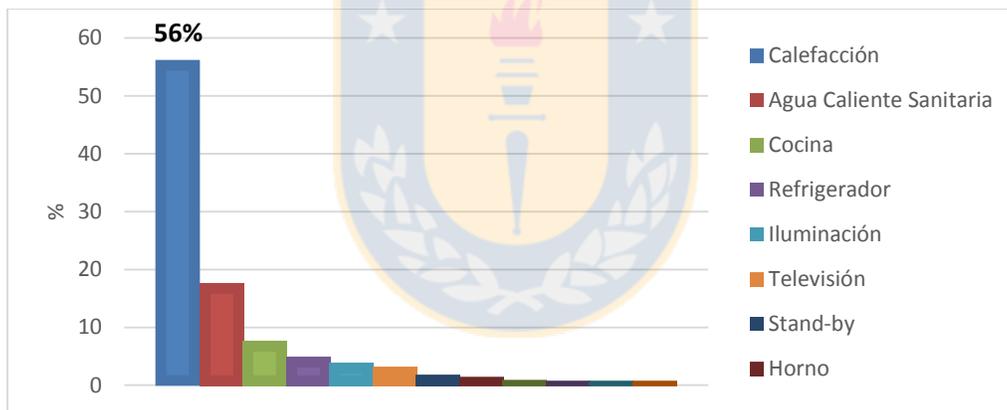


Figuras 2

Ilustración 2: Contribución de los energéticos en el consumo total del sector residencial en Chile.

Fuente: ("Anuario Estadístico de Energía", 2016)

En este contexto, la energía se consume mayoritariamente por la siguiente distribución de uso o equipos en el sector residencial: calefactores (56%), agua caliente sanitaria (17,6%), cocina (7,6%) y refrigeración (5%) según la figura 3 (CDT, 2010). Como se puede evidenciar los sistemas de calefacción consumen más del 56 % de los combustibles consumidos en el sector habitacional.



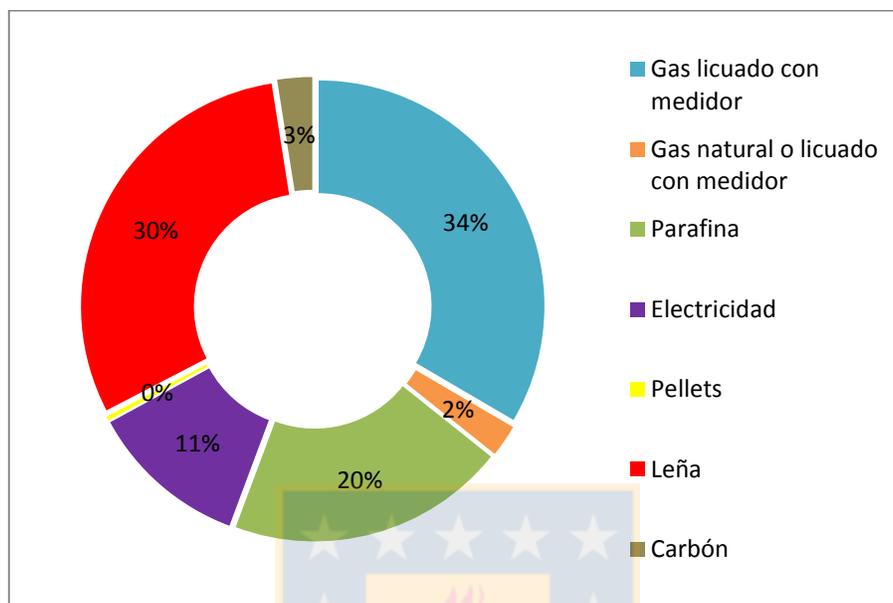
Figuras 3

Ilustración 3: Distribución de los principales usos de energéticos en el sector residencial en Chile.

Fuente: (CDT, 2010)

Según la figura 4 que corresponde a los resultados de las encuestas realizadas en un estudio en el sector residencial del año 2010, se obtuvo que la leña (30%) y gas licuado con medidor (34%) son los combustibles más utilizados en los calefactores (CDT, 2010). Un punto clave es que los calefactores que utilizan la leña como fuente de energía son el método menos eficiente, ya que se requiere consumir 167 kWh/m²año, a diferencia del calefactor eléctrico con 100 kWh/m² año y el gas natural

con 111 kWh/m² año. Sin embargo, los bajos precios de la biomasa en el mercado y su amplia disponibilidad hacen que este energético sea una alternativa más competitiva que el resto de los energéticos (Guevara Garrido, 2015).



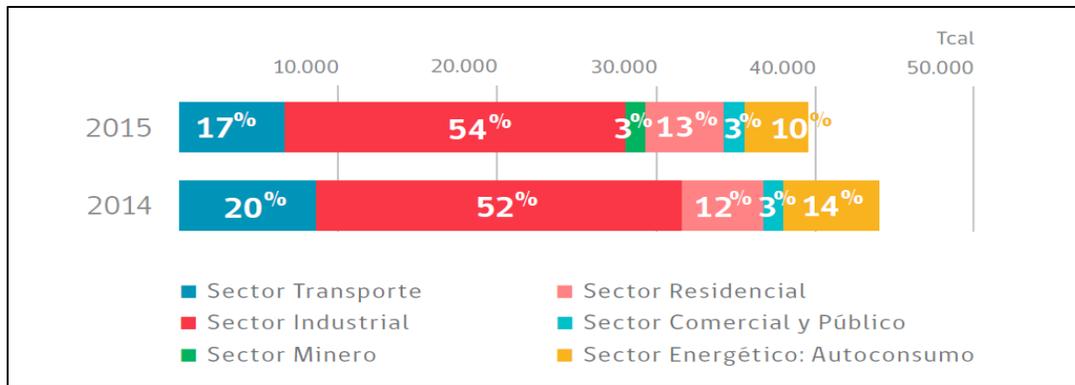
Figuras 4

Ilustración 4: Tipos de combustible usados en calefactores, en el sector residencial de Chile.

Fuente: (CDT, 2010)

2.5. Demanda energética del sector residencial en la región del Biobío

Las regiones que presentan un mayor consumo de energía en el sector residencial corresponden a la región Metropolitana, de los Lagos y del Biobío, las cuales tienen una participación en porcentaje de 30,1%, 13,8% y 12,7%, respectivamente. Según el ministerio de energía, la región del Biobío tuvo un consumo final de energía de 39.674 Tcal en el año 2015, el cual correspondió a un 14% del territorio nacional. La región del Biobío tiene tres sectores con mayores demandas, los cuales son el sector residencial (12,7%), el sector industrial (54%) y el sector del transporte (17%). Además, las fuentes energéticas más utilizadas son biomasa (38%), derivados de petróleo (38%) y electricidad (15%) ('Anuario Estadístico de Energía', 2016)).



Figuras 5

Ilustración 5: Distribución de consumo final por sector para la región del Biobío.

Fuente: ("Anuario Estadístico de Energía", 2016)

Los consumos de energía en el sector residencial, están directamente relacionados con las condiciones de aislamiento de la misma. En este sentido, viviendas con deficiente aislación térmica provocan altos consumos de energía, mayores costos asociados al consumo de energía y por consiguiente mayores contaminantes, principalmente al aire (Braulio-Gonzalo & Bovea, 2017; Uygunoğlu, Özgüven, & Çalış, 2016).

2.6. Reglamentación térmica chilena

En la década de 1970, surge en Chile la normativa de aislación térmica generada por el Instituto Nacional de Normalización (INN). Se mencionan las normativas más destacadas en la tabla 1 a partir del 1970 hasta el 2010. En el año 1996, se establece un *Programa de Reglamentación sobre Acondicionamiento Térmico de Viviendas*, contenida en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC). Por lo tanto, se establece una nueva política de mejoramiento general de los estándares de construcción por el ministerio de vivienda y urbanismo. Es importante mencionar, que se incorporó al reglamento en la OGUC principalmente porque este instrumento permite que las exigencias sean cumplidas de forma obligatoria a nivel nacional a diferencia de las normas que presentan un carácter opcional.

La modificación del reglamento tiene como objetivo que las viviendas cumplan con exigencias de acondicionamiento térmico según la zona térmica en la que se ubique. Por lo tanto, el territorio chileno se encuentra clasificado en siete zonas, según variación climática de grados/día, a tabla 2 especifica las ciudades más representativas (MINVU, 2006). Una normativa climático-habitacional que se presenta en la Nch 1079 Of 2008, corresponde a una normativa más exigente que la norma vigente y subdivide al país en nueve zonas de acuerdo al clima, variaciones de temperaturas y condiciones meteorológicas (Guevara Garrido, 2015).

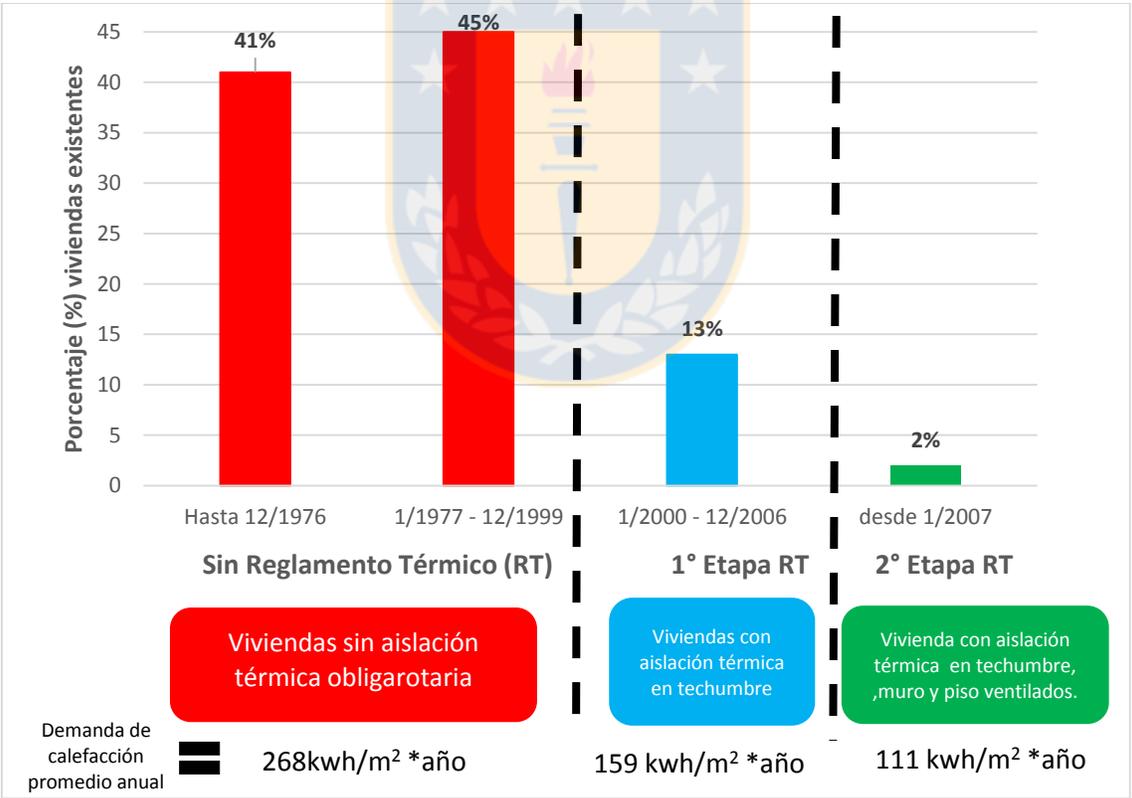
La normativa vigente consiste en 3 grandes etapas que se mencionan a continuación y en las tablas 2 y 3 se especifica los valores que se exigen en el territorio nacional.

- **Primera etapa:** Entrando en vigencia el año 2000, incorporando exigencias de aislación térmica para todas las techumbres de las viviendas según la zonificación que se establece para el territorio nacional chileno.
- **Segunda etapa:** Entrando en vigencia el 4 de enero del 2007, siendo el complemento de la primera etapa. Tiene como objetivo que las viviendas cumplan con la aislación térmica perimetral, es decir, en muros, ventanas, puertas y pisos.
- **Tercera etapa:** Entrando en vigencia el año 2013, consiste en la certificación energética de las viviendas, la cual no tiene un carácter obligatorio. Se clasifica una vivienda desde la letra “A” que es la más eficiente hasta la “G” que representa una vivienda menos eficiente. La letra “E” representa el estándar actual de construcción.

En base a lo anterior, las viviendas construidas antes del 2000 corresponden a un 86% del total de viviendas chilenas presentando menores exigencias térmicas y por consiguiente elevadas demandas de energía en calefacción, con valores promedio nacional de 267 kWh/m²año. En el periodo entre el 2001 y 2007, el 13% de las viviendas construidas presentan mejores condiciones térmicas alcanzando menores demandas de energías (159 kWh/m²año) que para las viviendas construidas antes

del 2000. A partir del 2008, los valores promedio de consumos energéticos disminuyeron a 111 kWh/m²año, sin embargo solamente el 2% de las viviendas existentes cuentan con este sistema de aislación térmica (CDT, 2010).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, las mejoras de eficiencia energética para lograr reducir el consumo de energía se establecieron a partir 2006, pero gran parte del parque residencial o edificio antiguos (86%) genera grandes consumos de energía ya que no cuenta con acondicionamiento térmico adecuado. Por lo tanto, las políticas se han centrado en modificar la deficiencia que presentan los edificios existentes con la entrega para este año 2019 - 8500 subsidios a familias de clase media a través de un programa de Protección del Patrimonio Familiar del Minvu y mediante páginas web que consiste en un sistema de información territorial para entregar información y orientar a las personas (MINV, 2019).



Figuras 6

Ilustración 6: Demanda de energía en calefacción promedio nacional (kwh/m²*año). RT: Reglamento Térmico contenido en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción.

Fuente: (CDT, 2010)

2.7. Balance energético en una vivienda

Un factor relevante para entender el consumo de energía de una vivienda, es comprender el comportamiento térmico que existe al interior de una vivienda para calificar de manera eficiente o ineficiente. El proceso en que dos cuerpos o distintas partes de un mismo cuerpo intercambian energía en forma de calor, debido a una diferencia de temperatura se denomina “transferencia de calor”, específicamente en una vivienda esto se produce a través de un aislamiento térmico para alcanzar un equilibrio entre el ambiente exterior e interior (Basri, 2016). Las envolventes térmicas son la principal barrera que protege a los ocupantes de una vivienda del clima adverso, ya que su principal función es limitar el flujo de energía o transferencia térmica entre el ambiente interior y exterior, propiciándoles confort térmico (L. Energía & Familiar, n.d.). A continuación, se detalla los tipos de transferencia de calor.

Conducción: Es la transferencia de energía en forma de calor basado en contacto directo, permitiendo igualar temperatura entre dos sistemas ya que el flujo de calor se dirige desde regiones de alta temperatura a otras de baja temperatura, hasta alcanzar el equilibrio térmico. (Andrade, 2007)

Convección: La transmisión de calor se produce por los movimientos de masa de un fluido (líquido o gas) entre zonas con diferentes temperaturas.

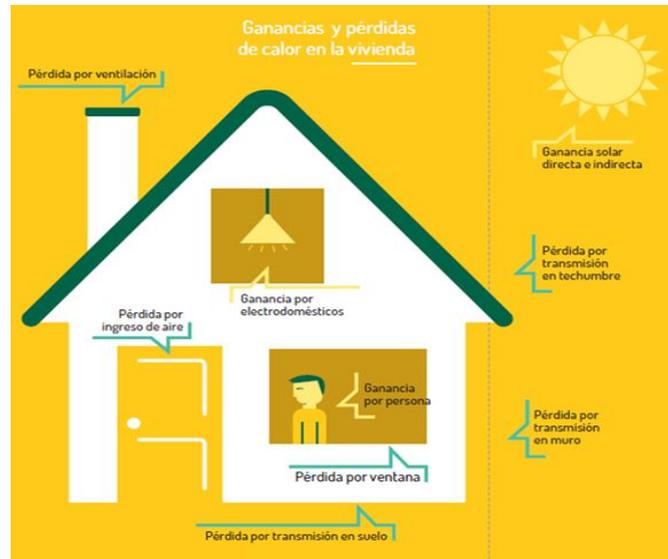
Radiación: Esta transferencia de calor no necesita un medio, ya que lo realiza por el vacío como ondas electromagnéticas producidas en cualquier cuerpo que se encuentre a una cierta temperatura, por ejemplo el sol (Bravo, 2013).

Mediante un balance de energía se puede determinar las condiciones térmicas que existen al interior de una vivienda, las cuales en general dependen de las ganancias y pérdidas de calor a través de las envolventes térmicas (Guevara Garrido, 2015), según se muestra en la **Figura 7**. Por lo tanto, una vivienda que presenta mayores ganancias de calor que las pérdidas, tenderá a calentarse o a enfriarse en caso contrario. En ambas situaciones el ambiente interior presenta condiciones de desconfort y de esta manera se definen los requerimientos de energía para la calefacción o refrigeración al igual que soluciones que se pueden implementar

como, por ejemplo, reacondicionamiento térmico de la envolvente térmica, sistema de calefacción eficiente, etc.

- ❖ **Ganancias de calor en una vivienda:** Estas se asocian a ganancias solares debido a la radiación que incide sobre una edificación, ya sea de manera directa al abrir las ventanas o indirecta por las superficies expuestas al exterior, tales como muros, techumbre, vidrio, etc. Otra ganancia corresponde a las internas, es decir, por fuentes de calor que se encuentran dentro de la vivienda y están compuestas por personas, iluminación y artefactos.
- ❖ **Las pérdidas de calor:** se producen mediante la conducción de calor que tiene la envolvente de la vivienda compuesta por muros, pisos y techumbre. Estos pueden generar pérdidas o ganancias de calor, dependiendo de la superficie expuesta al exterior, de las características térmicas y de la diferencia de temperatura. Se incluye pérdidas de calor por evaporación dentro o fuera de la vivienda por efecto del calor absorbido y ventilación de manera voluntaria por ejemplo abriendo las ventanas o de manera involuntaria debido a fisuras o aberturas de envolventes (CORFO, 2016).

Las pérdidas de calor en un edificio se deben en general en el siguiente orden decreciente: un 40% a paredes exteriores; 30% debido a las ventanas; 7% a la techumbre; 6% a la losa del sótano y 17% a las fugas de aire ((Uygunoğlu, Özgüven and Çalış, 2016). En cambio, en una vivienda aislada las principales pérdidas de calor corresponden a techumbre (30%), paredes (25%), renovación de aire y ventilación (20%), ventanas (13%), suelos (7%), puentes térmicos (5%).



Figuras 7

Ilustración 7: Balance Térmico de una vivienda.

Fuente: (Energía and Familiar, 2016)

Como se mencionó anteriormente una de las fuentes de pérdidas de calor en las viviendas están directamente relacionada con el envolvente térmico. Las viviendas con mayor demanda y/o consumo de energía es la vivienda aislando (0,8) y vivienda pareada (0,7). En cambio, la que presenta menor demanda de energía es el departamento (0,2) ya que presenta menos elementos en contacto con el exterior (Guevara Garrido, 2015). Siendo un factor determinante en los consumos energéticos y por consiguiente las emisiones al aire asociada a la combustión por concepto de calefacción.

2.8. Tipos de aislantes térmicos

El comportamiento energético residencial ha mejorado con la implementación de materiales aislantes, con el objetivo de reducir las pérdidas energéticas a través de las envolventes térmicas tales como: techumbre, muros, pisos, etc. (Yucer and Hepbasli, 2011; Papadopoulos, 2005; Karami, Al-Ayish and Gudmundsson, 2015). Los aislantes térmicos se pueden clasificar según su origen en sintético, orgánico e inorgánico.

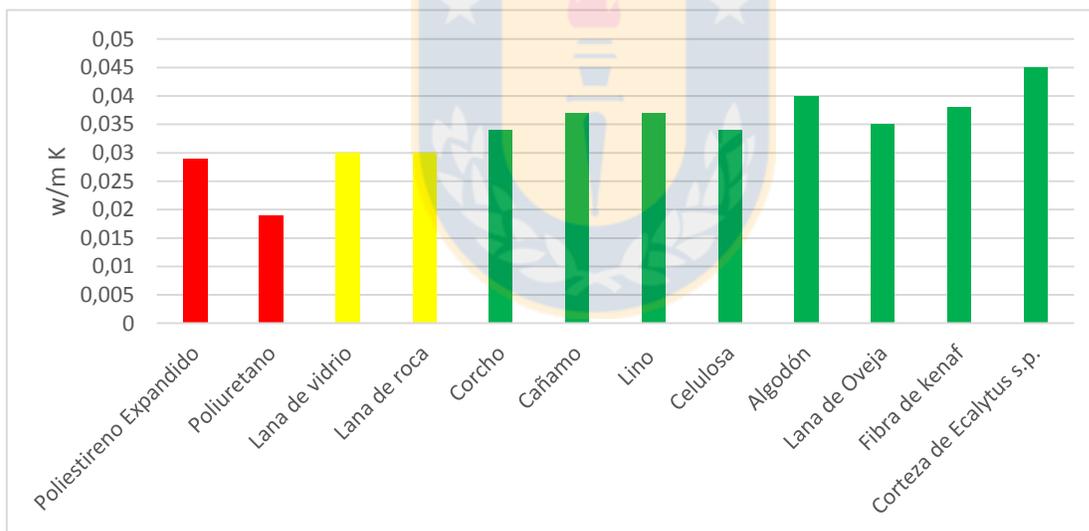
- **Materiales sintéticos:** Se forman a partir de moléculas naturales, en general se utilizan derivados del petróleo y mediante procesos químicos industriales convierte estas moléculas naturales en moléculas más útiles. Estos materiales de espuma plástica rígida son los que se utilizan con frecuencia en el aislamiento residencial, comercial e industrial. Dentro de esto se encuentran los poliestirenos y polipropilenos principalmente.
- **Materiales inorgánicos:** Están compuestos por combinación entre una amplia gama de elementos de la tabla periódica. Una de sus características de estos materiales es que son resistentes a elevadas temperaturas. Ejemplo de dichos materiales son perlita, lana de vidrio, etc.
- **Materiales orgánicos:** Corresponde a materiales renovables compuestos por fuentes vegetales y animales (corcho, algodón, etc.)

En Chile, los materiales aislantes más utilizados son los sintéticos e inorgánicos. Entre los materiales sintéticos se encuentra el poliestireno expandido y poliuretano. Por otro lado, los materiales inorgánicos más utilizados son: lana de roca y lana de vidrio. La fibra de vidrio es un producto fibroso y se obtiene a partir de la fundición de arena con alto contenido de sílice, adicionalmente se agrega carbonato de calcio, bórax y magnesio. El poliestireno expandido es una espuma rígida y se obtiene a partir de derivados del petróleo. (MMVU, 2014)

La conductividad térmica, es una propiedad térmica que caracteriza a un aislante. Mientras menores sean los valores de conductividad térmica mejor propiedad térmica se le confiere al material (Asdrubali *et al.*, 2017). La conductividad térmica de los materiales aislantes sintéticos, inorgánicos y orgánicos son comparativamente favorables. En la figura 8, se puede apreciar que los materiales aislantes sintéticos (poliuretano y poliestireno expandido) presenta mejores conductividad térmica, los cuales oscilan entre 0.025-0.029 W/mK (Rodríguez, 2015; Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014; Densley Tingley, Hathway and Davison, 2015; Schiavoni *et al.*, 2016; Zigart. 2018). En cambio, los materiales de origen naturales tales como: corcho 0,035-0,049 W/mK (Rodríguez, 2015; Schiavoni *et al.*, 2016), cáñamo 0,037 W/mK (Rodríguez, 2015; Schiavoni *et al.*,

2016), lana de oveja 0,035 W/mK (Rodríguez, 2015), corteza de eucalipto 0,045 W/mK (Fuentealba, C et al., 2017) presentan buenas conductividades térmicas, las cuales son ligeramente superiores a los materiales tradicionales.

Por otra parte, es importante destacar que estos materiales se caracterizan, además, por su buena conductividad térmica y acústica, son biodegradables, reutilizables, reciclables, fuentes de energía renovables y su manipulación no presenta toxicidad. Una de las desventajas principales de usar materiales de origen natural se debe a los riesgos asociados a la contaminación microbiana causado por la humedad y el agua (Kymalainer H., 2008). Particularmente, la corteza de eucalipto ha mostrado un buen comportamiento térmico en comparación con el resto de los materiales naturales. Este material se convierte en una alternativa prometedora, específicamente para Chile debido a las características forestales que presenta.



Figuras 8

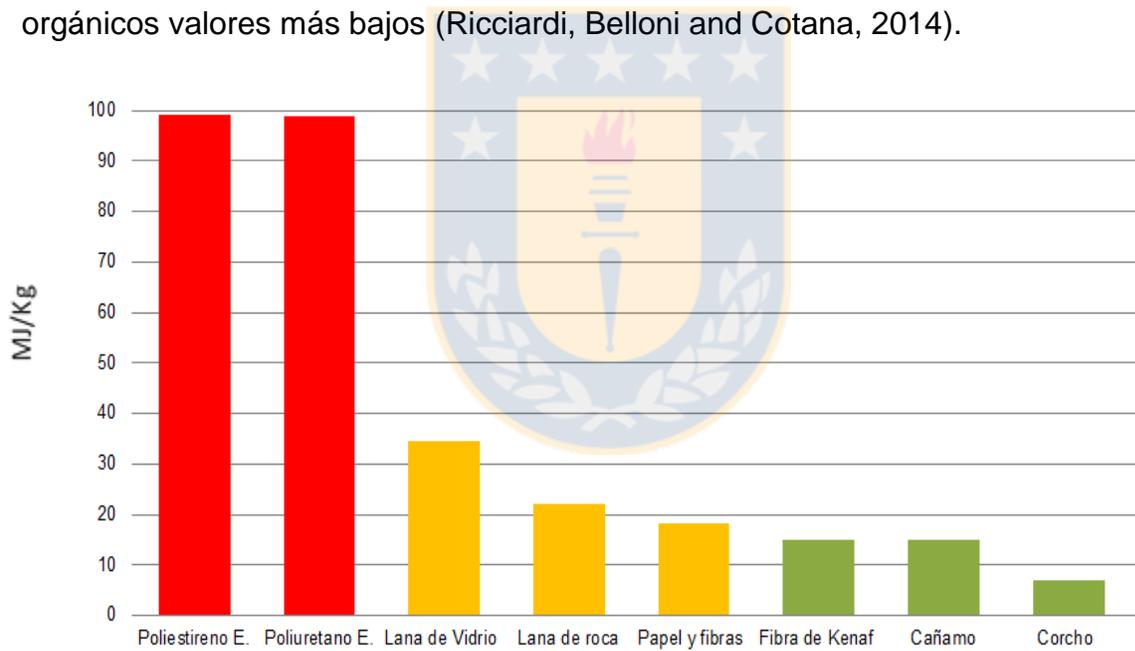
Ilustración 8: Conductividad Térmica de paneles aislantes con diferentes materias primas.

Fuente: (Rodríguez, 2015; Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014; Densley Tingley, Hathway and Davison, 2015; Schiavoni et al., 2016; Ardente et al., 2008; Fuentealba C et al., 2017)

Además, desde el punto de vista ambiental los materiales de origen natural presentan un menor impacto ambiental, asociados a que requieren menores consumos de energía para su fabricación y menores gases efecto invernadero (GEI)

como se muestra en la Figura 9 (Rodríguez, 2015; Buratti, Belloni, Lascaro, Merli, & Ricciardi, 2018; Buratti *et al.*, 2016; Ardente *et al.*, 2008)

Cabe destacar, que han incrementado las investigaciones de los materiales de aislamiento térmico y su energía incorporada en los edificios. La energía incorporada por unidad de masa, corresponde a la energía disponible que se consumió durante la fabricación de un producto. Las unidades que presenta son MJ/kg que significa megajulios de energía necesaria para hacer un kilogramo de producto y tCO₂ que se define como toneladas de dióxido de carbono emitido para hacer un kilogramo de producto. Según Ricciardi los materiales aislantes sintéticos poliestireno expandido y poliuretano requieren de alta energía incorporada por unidad de masa, los materiales inorgánicos presentan valores medio y materiales orgánicos valores más bajos (Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014).



Figuras 9

Ilustración 9: Requerimientos de energía para diferentes materiales aislantes.

Fuente: (Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014)

En los últimos años, se ha incrementado la sensibilidad para proteger el medio ambiente y la necesidad de producir menos materiales sintéticos que generen contaminación al ambiente. Es por esta razón que los biocompuestos, es decir, materiales compuestos ecológicos fabricados a partir de una matriz renovable con

fibras naturales o eco-sostenible. Existe una gran diversidad de fibras naturales para su aplicación como materiales aislantes. Estos pueden ser cáñamo, corcho, lino, celulosa, algodón, lana de oveja (Rodríguez, 2015).

Como se pudo evidenciar los materiales derivados de fibras naturales presenta ventajas medioambientales con respecto a los tradicionales, tales como menor dependencia de fuentes de energía o materiales no renovables. Asimismo, se caracteriza por tener otros beneficios como ser baratos, ligeros, biodegradabilidad al final de la vida útil, recuperación de energía, menores emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero (La Rosa et al., 2014)

2.9. Disponibilidad de biomasa en la región del Biobío

El *Eucalyptus s.p.* es la mayor fuente de fibra en Europa, Sudamérica, Japón y América del Sur y en particular en la Región del Biobío Chile. A nivel regional está desempeñando un papel relevante como materia prima fundamental en la producción de pulpa. Los últimos 43 años la población forestal con fines industriales ha incrementado desde 350.000 hectáreas en el año 1970 llegando a 3.084.354 de hectárea en el año 2017. La región del Biobío es la principal zona forestal con un 41% de la superficie total plantada. Por lo tanto, en esta región la superficie de plantación es de 1.255.890 hectáreas, de este total el 63% corresponde a *Pinus Radiata* y 34% *Eucalyptus sp.* (CONAF, 2017). En Chile la Industria de Aserrío genera como productos madera aserrada, madera elaborada, tapas y astillas. Igualmente se generan residuos, tales como corteza con volúmenes aproximado de generación de 1.329.154m³, resultando ser el segundo subproducto más abundante con un total de 25% y el primero es aserrín con un 52% del total (INFOR, 2015).

Actualmente la corteza de eucalipto tiene su mayor aplicación para fines energéticos. Sin embargo, presenta limitaciones por sus altos contenidos de humedad, naturaleza higroscópica, baja masa, alto contenido de resinas (Back y Allen, 2000) y densidad energética (Hansted et al., 2016). Por otra parte, se ha evidenciado importante potencialidades de la corteza de eucalipto como base de la producción de diferentes biocompuestos, tales como: compuestos lipófilos y

compuestos polifenólicos (Wegener, 1984), sustitutos de los fenoles para su aplicación en adhesivos y posible antifúngico (Braga et al., 2007), así como, biocombustible mediante una plataforma bioquímica se puede producir bioetanol y gas síntesis a través de pirólisis (Días y Arroja, 2012; Pérez Cruzado et al., 2011).

En paralelo, estudios realizados por Fuentealba en 2017 han evaluado la factibilidad de usar la corteza con fines de material aislante, demostrando su competitividad como material aislante frente a los aislantes tradicionales desde el punto de vista de sus características térmicas. Sin embargo, hasta el momento no se ha reportado, sus impactos ambientales durante toda su cadena de producción, con el objetivo de visualizar los beneficios en comparación con los materiales tradicionales y los reportados por la literatura.

2.10. Análisis de Ciclo de vida (ACV)

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta que permite la evaluación de los potenciales impactos ambientales de procesos y productos a lo largo de su ciclo de vida considerando desde la extracción de materias primas hasta cuando termina su vida útil. Esta metodología es definida en la normativa internacional ISO 14.040, 2006 para la aplicación de la evaluación del ciclo de vida (Organización Internacional para la Estandarización, 2006; Heikkila K., 2004; Scheuer et al., 2003). La metodología de ACV consta de 4 fases, las cuales se describen a continuación:

- **Definición objetivo y alcance:** Se especifica el objetivo del estudio para poder establecer detalladamente como se realizará la evaluación ambiental al determinar: los límites del sistema, la unidad funcional, la asignación de carga.
- **Análisis de Inventario:** Se utiliza fuentes primaria, secundaria y terciaria para obtener un inventario que detalla todas las entradas y salidas que se encuentran dentro del límite del sistema seleccionado.

Evaluación de impactos: Se relaciona los datos del inventario a un impacto ambiental o daño a la salud para poder realizar una posterior interpretación del proceso productivo.

- **Interpretación:** Se logra identificar las etapas que presenta mayor impacto ambiental o daño a la salud. También se puede obtener el impacto ambiental o daño a la salud que tiene mayor consideración en todo el proceso de fabricación de un producto.

2.11. Aplicaciones del ACV en el sector construcción

En el sector de la construcción se ha utilizado el ACV para la toma de decisiones en el mejoramiento de la sostenibilidad de la industria principalmente por las preocupaciones de la salud pública, agotamiento del medio ambiente y recursos (Bond et al., 2013; Morrison-Saunders et al., 2015). Las investigaciones se han centrado en utilizar como materia prima las fibras naturales para la fabricación de paneles, los cuales se caractericen por presentar menores consumos energéticos y bajos en emisiones de carbono. Los últimos estudios han demostrado que el uso de fibras naturales reduce los impactos ambientales en relación a los materiales convencionales (Teshnizi *et al.*, 2018). Enfocándose en dos impactos principalmente: potencial calentamiento global y agotamiento de combustibles fósiles (Buratti *et al.*, 2018; Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014))

Quintana (Quintana *et al.*, 2018) realizó una evaluación comparativa entre paneles tradicional con yeso y tableros compuestos por fibras naturales tales como Lino, Yute, Bonote, cáñamo y algodón triturado. Este ACV utilizó el método IPPC. GWP 100 años obteniendo que las emisiones de carbono se reduzcan en un 40% al utilizar algodón triturado y 60% al utilizar tableros con lino. Además, se utilizó otro método denominado punto final para identificar categorías de daños los resultaron arrojaron que los materiales con fibras naturales presentan una disminución de un 31 hasta 50% en comparación al panel de yeso. Es importante destacar que los materiales orgánicos presentaron menor impacto a los recursos, ecosistemas y salud humana a excepción del panel con Bonote.

Por otra parte, Ricciardi (Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014) estudio el comportamiento de panel fabricado con papel reciclado y fibras textiles, presentando un buen comportamiento térmico (0,034 W/ m K) en comparación los

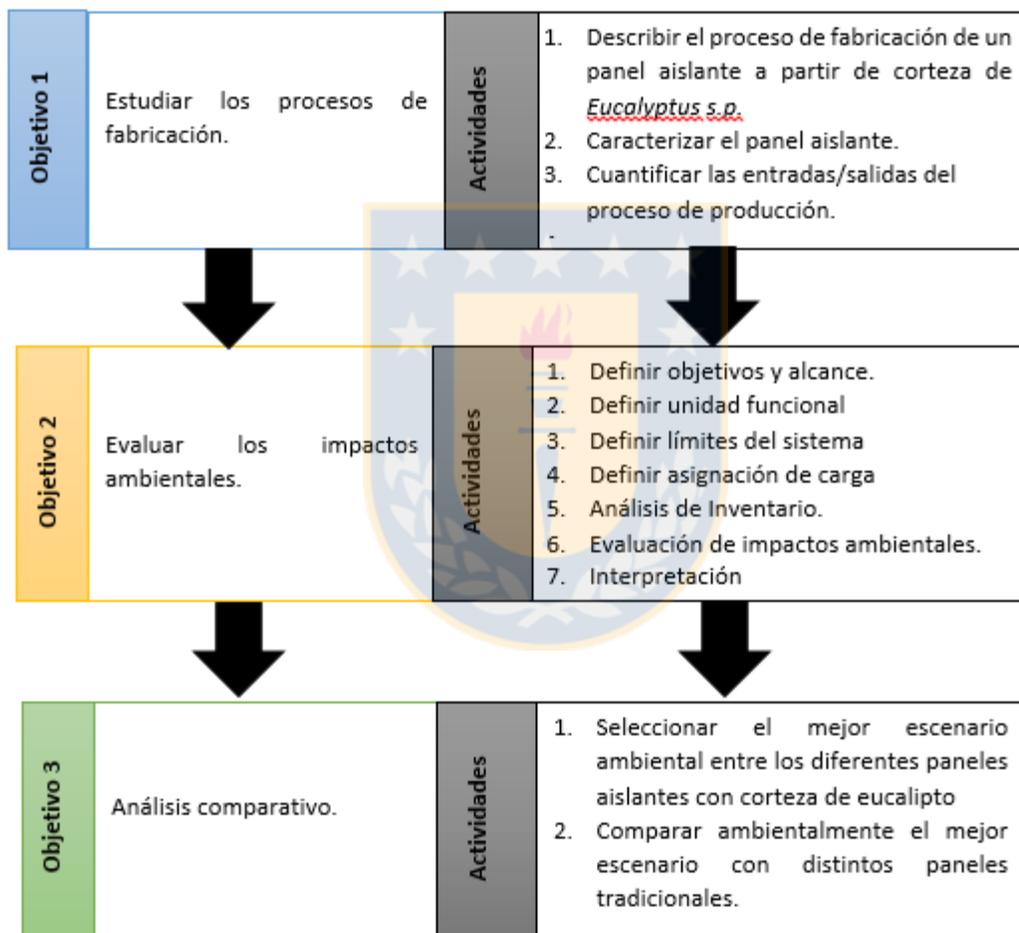
paneles aislante: fibra de kenaf (0,038 W/ m K); lana de roca (0,04 W/ m K); fibra de vidrio (0,04 W/ m K); polietileno expandido (0,04 W/ m K); entre otros. El principal problema es que el panel aislante en estudio provoca altos consumos de energía (267,7 MJ/fu y potencial calentamiento global (14,68 kg CO₂ eq./ Fu). La razón principal es que para obtener una buena resistencia térmica se requiere una alta densidad másica (433 kg/m³) es decir, un alto consumo de recursos y energía. Además, cerca del 27% del peso total es el pegamento que requiere un alto consumo de energía.

Recientemente, Buratti *et al.*, 2018 han demostrado que el panel aislante orgánico fabricado a partir de cascarilla de arroz (RH) y cáscaras de café (CC) obtuvieron mejores desempeños ambientales en cuanto a energía incorporada y categoría de calentamiento global (GWP 100 años) al compararlos con otros materiales aislantes fabricados con desechos de Corcho (COR), neumático granulado (ETL), papel usado prensado y pegado con fibras de polietileno (WP1), papel usado prensado y pegado (WP2) y papel prensado y usado con fibras de lana (WP3).

Estos demuestran que la herramienta de ACV ha constituido un aporte en el desarrollo de nuevos materiales aislante, permitiendo comparar entre diferentes paneles ya sean tradicionales como no tradicionales. Además, los estudios presentados hasta el momento se centran en dos categorías de impactos, las cuales son demanda acumulada de energía y emisiones GEI. Por otra parte, también se ha podido visualizar las etapas dentro del ciclo de vida de fabricación de los paneles con mayores contribuciones.

3. METODOLOGÍA

Se aplicará la siguiente metodología para llevar a cabo la determinación de los impactos ambientales de la fabricación del panel aislante proveniente de fibras de corteza de Eucalipto, así como, comparar su desempeño ambiental con materiales aislantes tradicionales y reportados en la literatura. El procedimiento metodológico, el cual está compuesto por un conjunto de actividades que se le asigna a cada objetivo específico se aprecia en la Figura 10 de manera resumida.



Figuras 10

Ilustración 10: Resumen Metodológico para cada objetivo específico.

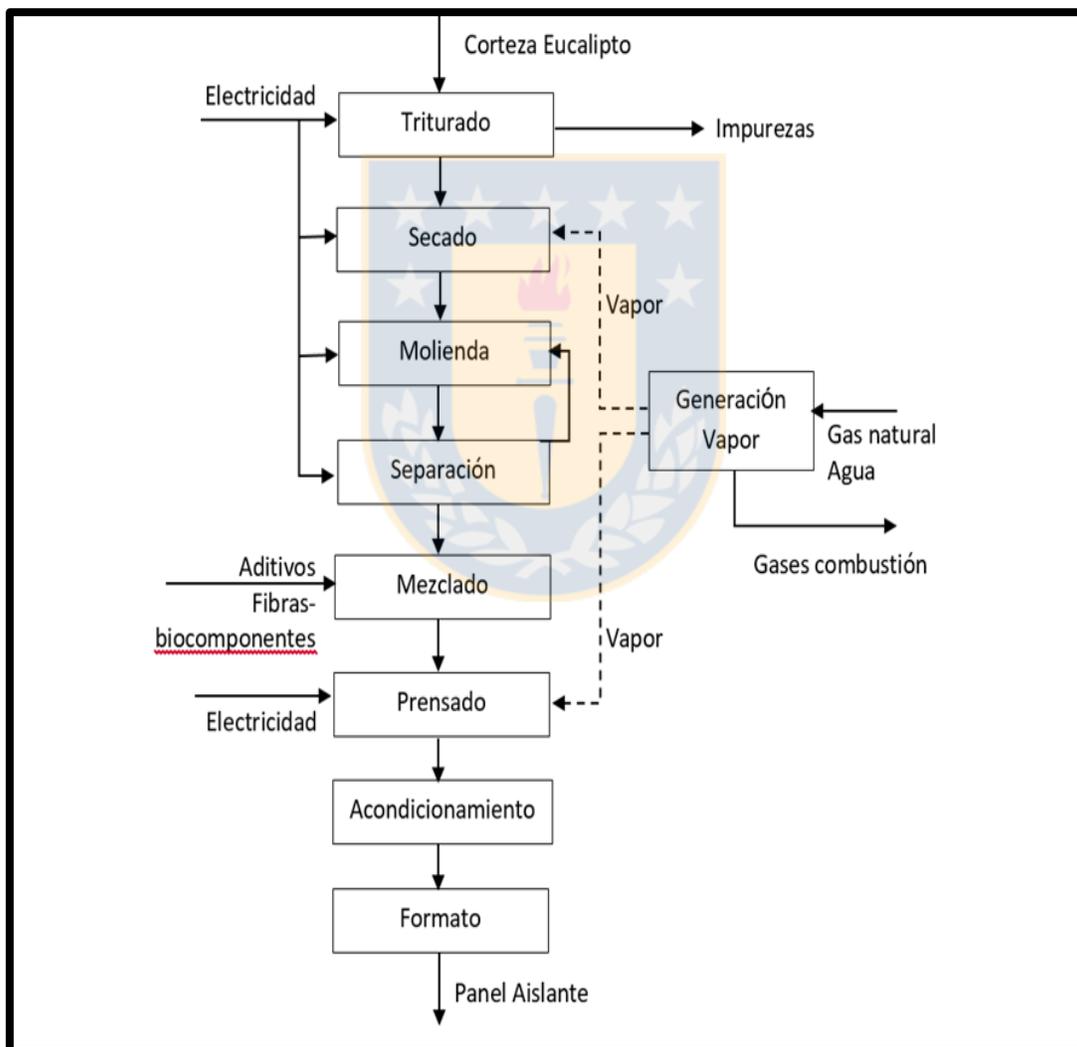
Fuente: (Elaboración Propia)

A continuación, se describirán cada una de las actividades consideradas en los tres objetivos específicos.

3.1. Objetivo 1: Estudiar los procesos de fabricación.

3.1.1. Descripción del proceso de fabricación del panel aislante

El proceso de fabricación de panel aislante térmico flexible está compuesto por nueve procesos unitarios denominados: trituración, secado, molienda, separación, mezclado/ encolado, prensado, acondicionamiento y dimensionamiento. En la Figura 11 se observa un diagrama de bloque de la planta de fabricación del panel aislante flexible. Cabe mencionar que el proceso de producción del panel aislante está patentado bajo la solicitud de patente nacional CL201603408.



Figuras 11

Ilustración 11: Diagrama de Bloque del proceso de fabricación de panel aislante térmico a partir de corteza de eucalipto.

Fuente: (Elaboración Propia)

A continuación se describe de forma general cada una de las etapas señaladas en la figura 11.

- **Trituración:** El objetivo de esta etapa es disminuir el tamaño de la corteza fresca, para facilitar la manipulación en los siguientes procesos. La máquina que se utiliza para cumplir este objetivo requiere de electricidad y está compuesta por un conjunto de cuchillos. La operación comienza con el ingreso de la corteza a una máquina trituradora. Luego de transcurrido aproximadamente 30 minutos se obtiene como resultado residuos o impurezas y las partículas de longitud igual o inferior a 20cm son el producto deseado que ingresara a la etapa de secado.
- **Secado:** La finalidad de esta etapa, es disminuir el contenido de agua que presentan las partículas de corteza de eucalipto *Eucalytus s.p.* para garantizar un buen desempeño de los equipos mecánicos (molienda). Por lo tanto, las partículas ingresan con una humedad de 150% base de corteza seca. al equipo de secado que funciona a través de electricidad y vapor, disminuyendo la humedad hasta alcanzar el rango 16-30 % base de corteza seca. Es importante destacar que en este proceso se obtiene una segunda salida que corresponde a agua.
- **Molienda:** El propósito de esta etapa es producir un material fibroso. Un molino de martillos que funciona con electricidad tiene la función de realizar esfuerzos de cizalle y compresión sobre las partículas de corteza. De esta manera el equipo obtiene fibras con bastante esbeltez con diferentes tamaños. Por último, resaltar que la humedad de la corteza, es un factor relevante.
- **Separación:** Esta etapa consiste en separar las partículas finas, para evitar un consumo excesivo de fibra bicomponente durante el encolado. Las tecnologías que pueden utilizar son succión de aire, rodillos de separación, cardas, cribas vibratorias, etc., las cuales funcionan mediante la utilización de electricidad. El equipo permite obtener como resultado partículas grandes que se recirculan a la etapa de molienda. Otro flujo de salida que se obtiene son las partículas finas que ingresan a la etapa del mezclado.

- **Mezclado / Encolado:** En esta etapa se requiere incorporar un agente de anclaje denominado fibras sintéticas biocomponentes para fabricar un panel aislante flexible. En primer lugar, se encuentra establecida la cantidad másica que se requiere para obtener una densidad específica de panel aislante térmico. Por lo tanto, un 96% corresponde a la masa seca de corteza de *Eucalyptus s.p.* y un 4% a la masa de Biocomponente. Las proporciones mencionadas anteriormente son ingresadas a un equipo que permite obtener una mezcla homogénea. Este equipo está compuesto por un tambor que se conecta a una aspiradora, la cual permite succionar partículas pequeñas y el material ingresado superior a 0,6mm se mueva constantemente al interior en la superficie. Es importante destacar que el Biocomponente cumple una función de adherirse a la corteza de *Eucalyptus s.p.* Esto ocurre debido a que el Biocomponente está compuesto por polipropileno (1) en la primera capa o al interior y sirve de anclaje en la etapa de presado. En cambio, el segundo componente denominado polietileno (2) se encuentra al exterior y se funde a más baja temperatura permitiendo adherirse a la corteza de *Eucalyptus s.p.* en la etapa de mezclado. Se incluye en esta etapa, el ingreso de dos productos aditivos: ignífugo y antifúngico, principalmente para la protección del material orgánico contra incendios y afectaciones de hongos.
- **Formación y pre-prensado:** Este proceso unitario tiene como finalidad cumplir con los requerimientos de producción del panel aislante térmico flexible, mediante la definición de su densidad y espesor. La estación de formación, es la encargada de recibir el material encolado o mezclado y realizar la formación de un manto cumpliendo con la estandarización que se explicó anteriormente. Además, almacena y dosifica mediante rodillos transportándola hacia una cinta transportadora, la cual lleva el material hacia una estación de pre-prensado. Por otro lado, el pre-prensado tiene como objetivo eliminar los excesos de aire al interior del material mediante compresión lenta para seguir con la siguiente etapa.
- **Prensado:** La finalidad de esta etapa es obtener un espesor deseado para el panel y. En esta etapa se utiliza una tecnología denominada Continuous Steam

System (CSS) funcionando por medio de electricidad y vapor, la cual es una presa continua que tiene como entrada el material del pre-prensado y simultáneamente vapor saturado o una mezcla de vapor/aire, el cual atraviesa el panel. Es importante mencionar que la temperatura del vapor se encuentra alrededor de 120 °C, siendo la adecuada para producir la fusión de la capa externa de las fibras biocomponentes. Por último, a la salida de la prensa presenta una sierra circular que corta el panel en sentido transversal cada 1,2 m.

- **Acondicionamiento:** En esta etapa tiene como función que almacenar los paneles térmicos en un espacio adecuado, para lograr alcanzar humedad de equilibrio. Luego, este material es ingresado a la etapa final denominada dimensionado.
- **Dimensionamiento:** En la etapa final se dimensiona según los formatos estandarizados de productos para su posterior distribución al mercado.
- **Generación de vapor:** El vapor que se requiere en la etapa de secado y prensado se obtiene desde la caldera de generación de vapor siendo el gas natural el combustible principal.

3.1.2. Caracterización del panel aislante.

Se llevó a cabo la caracterización del material aislante para estudiar su desempeño como aislante. En este caso, se utilizó primeramente probetas que poseen una dimensión de 12,5 X 5 X 4,5cm. Las mismas fueron enumeradas en ambos extremos para realizar un registro sistematizado para identificar evoluciones al transcurso de los ensayos. En la Tabla 1 se describen las características y las técnicas usadas para determinar las propiedades de dicho material. Una descripción detallada de cada técnica y método de cálculo usado para determinar las propiedades del panel se muestra en el Anexo 2.

Tabla 1: Técnicas para medir las propiedades del panel aislante.

Propiedad	Unidad	Norma	Técnica/Equipamiento
Densidad	Kg/m ³	EN 1602	Definición
Conductividad térmica, λ	W/m.K	ASTM D 5334-08	Método de anillo
	W/m.K	NCh850 Of.2008	Método de anillo
Difusividad térmica, 10^{-7}	m ² /s	EN 12667	Fórmula matemática.
Calor específico	J/kg.K	EN 12667	Fórmula matemática.
Espesor	Mm	NCh853	Fórmula matemática.
Resistencia térmica, R100 (25 kg/m³)	m ² .K/W	EN 12667	Fórmula matemática.
Resistencia al avance de la llama	-	ASTM D 4986-03	Exposición a la llama
Resistencia a mohos	-	ASTM D 3273-12	Exposición al mohos
Factor de resistencia a la difusión de vapor, μ	-	NCh 2457 Of.2001	Método seco

3.1.3. Cuantificar las entradas y salidas del proceso de fabricación

En esta actividad se identificaron y cuantificaron todas las materias primas, insumos, aditivos, consumos eléctricos que se requieran en la entrada, así como también las emisiones, productos, co-productos que se generan a la salida de este sistema de producción para posteriormente utilizarlo en el inventario de la metodología de Análisis de ciclo de vida. Se midieron las cantidades de fibras biocomponentes, material ignifugo y antifúngico por cada panel obtenido. De la misma, forma se cuantificaron la cantidad de impurezas provenientes de la fase de molienda. Las demandas de electricidad, se estimaron en función de los datos de chapas de cada equipo y el tiempo de operación. La demanda de gas natural usados en la caldera de vapor se obtuvo por el registro de consumo de la caldera. En cambio las emisiones de gaseoso producto de la combustión del gas natural se estimaron mediante la metodología AP-42. El consumo de vapor fue obtenido de un informe de pre-factibilidad técnico-económica realizado en la UDT el año 2017 (Fuentealba C et al., 2017)

3.2. Evaluación de los impactos ambientales

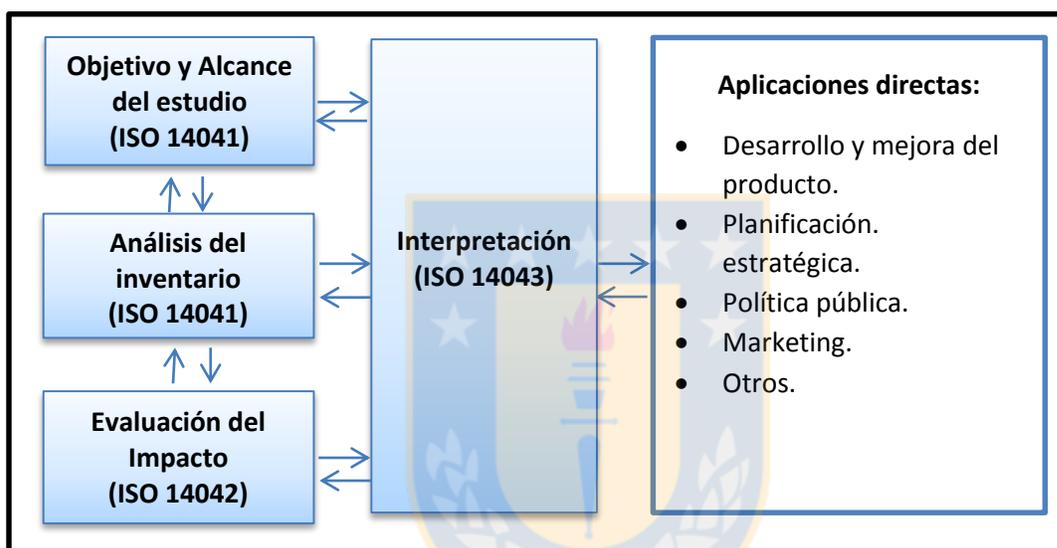
La etapa final del proyecto de fabricación de paneles aislantes térmicos flexibles de corteza de *Eucalyptus s.p.*, realizado en la Unidad de desarrollo tecnológico (UDT), consiste en efectuar una evaluación de los impactos ambientales.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es la metodología que se aplica para evaluar los potenciales impactos ambientales asociados a un panel aislante térmico flexible a partir de corteza de eucalyptu s.p., a lo largo de todo su ciclo de vida. Dicho proyecto de ACV se basa en la normativa desarrollada por “International Standars Organisation” ISO. Actualmente existen dos normas ISO (ISO 14040, 2006 e ISO 14044, 2006) que permiten realizar una evaluación de ciclo de vida, las cuales se mencionan a continuación:

- ISO 14040: Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de vida: Principios y marco de referencia.
- ISO 14044: Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de vida: Requisitos y

directrices.

La metodología propuesta por la normativa ISO 14040 explica que un estudio de ACV se divide en cuatro fases: Objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación, según se muestra en la figura 12. Además, el ACV es una técnica iterativa, puesto que al ejecutar cada una de las fases mencionadas anteriormente se puede incrementar el nivel de detalle al realizar sucesivas iteraciones, es decir, se pueden mejorar cada una de las fases en función de los objetivos y consideraciones del estudio (Hans, 2015).



Figuras 12

Ilustración 12: Las fases de un ACV y aplicaciones directas.

Fuente: (ISO 14040, 2006)

3.2.1. Objetivos y alcance

El objetivo de este estudio es determinar los potenciales impactos ambientales generados en el proceso de fabricación de un panel aislante térmico flexible fabricado en base a fibras de *eucalyptus sp.*, en toda su cadena de producción, desde la cuna a la puerta. Se evaluarán cuatro escenarios distintos, compuestos por paneles aislantes con diferentes densidades tales como: 20, 50, 75 y 100 [kg/m³] para comparar y seleccionar el mejor producto en términos ambientales.

3.2.2. Unidad Funcional (UF)

La unidad funcional, se define como la “cuantificación de la función de un sistema del producto, servicio o actividad, que se utiliza como unidad de referencia en el estudio de ACV” según la norma ISO 14040. Por consiguiente, todas las entradas y salidas de cada proceso unitario quedaran determinadas por esta unidad funcional que cuantifica el rendimiento del sistema. En cambio, el flujo de referencia se establece en relación a la unidad funcional y corresponde a la cantidad de producto necesario para cumplir con la función expresada mediante la unidad funcional (ISO 14040, 2006). El sistema que se estudiara es la “**fabricación de un panel aislante térmico flexible**” y la función de este producto es cumplir con los requerimientos de aislación térmica específicamente en muros, los cuales se establecen según una determinada zonificación térmica para cada ciudad, según la ordenanza general de urbanismo y construcción en el artículo 4.1.10 como se observa en la tabla 2 (MINVU, 2006).

Tabla 2: Exigencias mínimas de resistencia térmica multiplicado por 100 (R100) de un material aislante incorporado al complejo de muro, según zona térmica (NCh 2251).

Zonificación Térmica	Ciudades Representativas	Muros R100 (m ² K/ W)
Zona 1	Arica, Iquique, Antofagasta, Copiapó, La Serena.	23
Zona 2	Calama, Ovalle, Viña del Mar, Valparaíso.	23
Zona 3	Los Andes, Santiago, Rancagua.	40
Zona 4	Talca, Chillán, Concepción.	46
Zona 5	Temuco, Valdivia, Osorno.	50
Zona 6	Puerto Montt.	78
Zona 7	Aysén, Punta Arenas, Antártida.	154

Fuente: NCh 2251.

El material aislante en estudio puede ser usado en el muro de una vivienda localizada en cualquiera zonificación térmica ya que la resistencia térmica multiplicada por 100 (R100) perteneciente al nuevo panel aislante con corteza de

Eucalyptus s.p se encuentra en un rango de 111- 223 m² K/ W (Tabla 3) sobrepasando los valores mínimos establecidos en la norma. La región del Biobío pertenece a la zona 4 y la exigencias mínimas para los materiales aislante en los muros es de 46 m² K/ W ((Tabla 2).

En este estudio, se define una UF de tipo funcional y se describe como una resistencia térmica R igual a 1 m²K/W. Por otra parte, según el consejo para productores europeos de materiales para la construcción en aplicaciones térmicas se define, el flujo de referencia como la masa (kg) de panel aislante que se requiere para obtener una resistencia térmica mencionada anteriormente (Ardente *et al.*, 2008; Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014; Buratti *et al.*, 2018).

$$m = R \lambda \rho A \quad (\text{Ecuación 1})$$

Siendo:

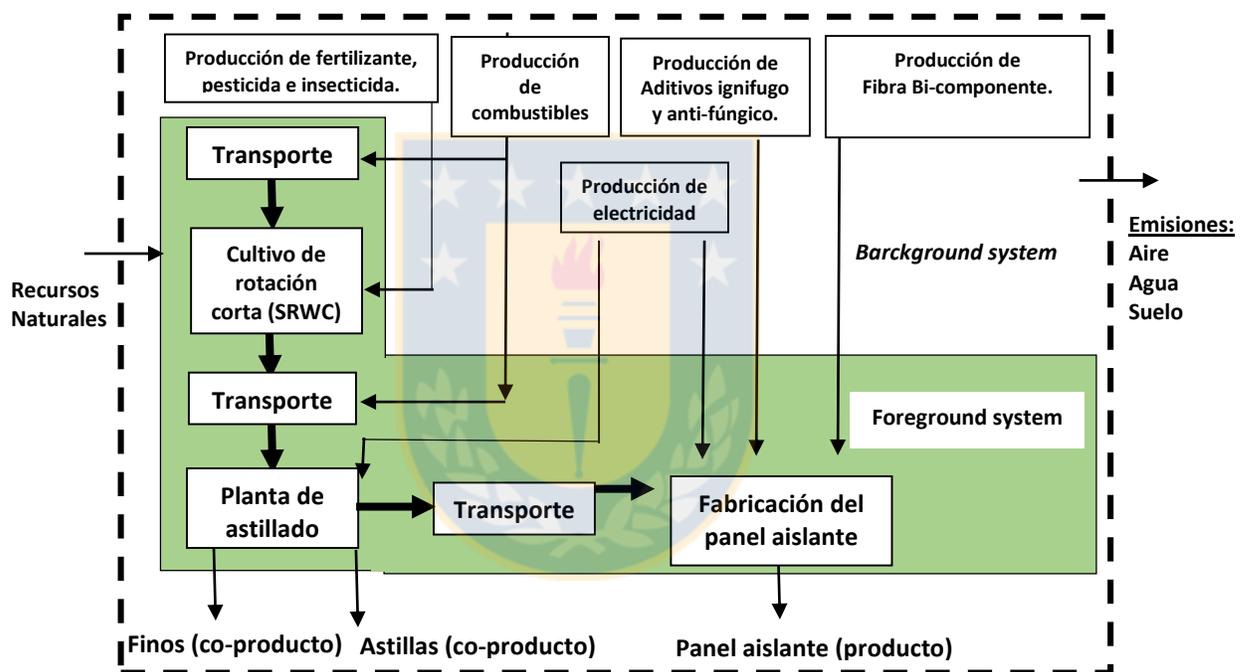
- m: Flujo de referencia (kg)
- R: Resistencia térmica igual a 1 [m²K/W]
- λ: Conductividad térmica del panel en [W/(m K)]
- ρ: Densidad del panel en [kg/m³]
- A: Área igual a 1 [m²]

En cada escenario, se obtendrán diferentes flujos de referencias expresado en kg, el cual corresponde a la cantidad de material de aislamiento necesario para obtener una resistencia térmica de 1 m²K/W.

3.2.3. Límites del sistema

El límite del sistema, permite determinar los procesos unitarios que se centrara el ACV. Por lo tanto, el enfoque de esta investigación es desde la “*cuna a la puerta*” según se muestra en la figura 13. En otras palabras, se evaluarán los flujos de energía, masa e impactos ambientales considerando las etapas comprendidas desde la “Cuna” o la obtención de materias primas hasta la “Puerta” de la planta de fabricación del panel aislante (Sudoe, 2014).

En la evaluación de los impactos ambientales asociados a la implementación y operación en construcciones, así como, su disposición final al cabo del final de la vida útil se excluyeron del presente estudio, debido a que como es un material en fase de desarrollo no se dispone de información para evaluar estas fases del ciclo de vida. Similares consideraciones fueron realizadas por Buratti *et al.*, 2018 ya que el panel aislante con cáscara de arroz aún se encuentra en una etapa de investigación y no existen datos suficientes (Buratti et al., 2018). En síntesis, se analizaron cuatro grandes etapas del ciclo de vida denominadas: Cultivo de rotación corta (SRWC), transporte, planta de astillado y fabricación del panel aislante.



Figuras 13

Ilustración 13: Límites del sistema de la cuna a la puerta de la fabricación de panel aislante térmico de corteza de Eucalyptus s.p..

Fuente: (Elaboración propia)

3.2.3.1. Cultivo de rotación corta (SRWC)

Un cultivo de rotación corta (SRWC) es una práctica intensiva principalmente por los periodos cortos de tiempo en que se talan la madera (Heller et al., 2003) ya que crecen en tierras carentes de nutrientes generando un aumento de la biomasa (Rahman et al., 2014). En este estudio se utilizó los datos primarios de un **escenario**

típico forestal perteneciente a la región del Biobío de Chile. El periodo de cosecha de la plantación es de 12 años y se realiza en tres ciclos de corte repetitivos cada 4 años.

Los límites de esta etapa contempla la plantación de *Eucalyptus globulus* de 1 hectárea ubicada en dicha región mencionada anteriormente (Morales *et al.*, 2015). La **producción de semillas** se excluye de los límites del sistema principalmente porque que no existe información. Estableciéndose que las semillas son obtenidas manualmente del bosque. Los residuales tales como las ramas, hojas, restos de madera se disperse en el suelo para mejorar la calidad del suelo. Por otro lado, para la producción de plántulas y del árbol se tienen en cuenta los requerimientos de sustancias químicas para lograr el crecimiento sin mayores inconvenientes. En resumen, se considera la producción de combustibles fósiles, fertilizantes, insecticida, pesticida, maceta de poliestireno expandido y sustrato de corteza de pino.

3.2.3.2. *Planta de astillado*

El rollo de árbol de corteza de *Eucalyptus s.p.* llega en un camión a la planta de aserrado ubicado en Santa Juana. Luego, se dispone esta materia prima en el sector de acopio, en donde se realiza riegos mediante un dispersor durante 8 horas cada día. Se utiliza un camión con cargador de agarre para cargar el rollo de árbol hacia la planta de aserrado la cual mediante una cinta transportadora llega a la zona de descortezado con cuchillas para poder cortar la corteza de *Eucalyptus s.p.* para luego llevarla hacia una cinta transportadora que dispone en una zona el residuo. Luego, el tronco sin corteza se dirige a un chipiadero para obtener el producto deseado "Chip" para poder cargar un camión y enviarlo al mercado (Li and Del, 2013).

- ❖ Sector de acopio
- ❖ Descortezado
- ❖ Chipeado

3.2.3.3. *Fabricación del panel aislante flexible*

En dicha etapa se considera la recepción de la biomasa en la planta piloto de fabricación de panel ubicada en la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT). Los procesos que se llevan a cabo según los detallados en la Figura 11 son: triturado, secado, molienda, separado, mezclado, pre-prensado y prensado, acondicionado y formateo. Se requiere de electricidad, consumos de combustible, vapor, aditivos ignífugo, aditivos antifúngico, fibras biocomponente y agua.

3.2.3.4. *Transporte*

Se establecieron límites geográficos para enmarcar el transporte de las diferentes materias primas insumos según se muestra en la Figura 14. En este estudio, se centró en los límites geográficos de la región del Biobío, ya que de esta zona se obtiene la principal materia prima corteza de eucalipto. Esto se debe a que jerárquicamente es la primera zona forestal de Chile debido al clima mediterráneo templado que favorece el crecimiento de las plantaciones y, por lo tanto, genera grandes volúmenes de residuos de corteza de *Eucalyptus s.p.*. En esta misma región, se encuentra localizada la planta piloto de fabricación de panel de eucalipto. Además, de contar con varias plantas de astillados, la cual constituye la principal fuente de generación de corteza de eucalipto. La etapa de transporte se llevara a cabo en camiones EURO 3 con capacidad de 16 -32 toneladas. A continuación se especifican los transportes considerados.

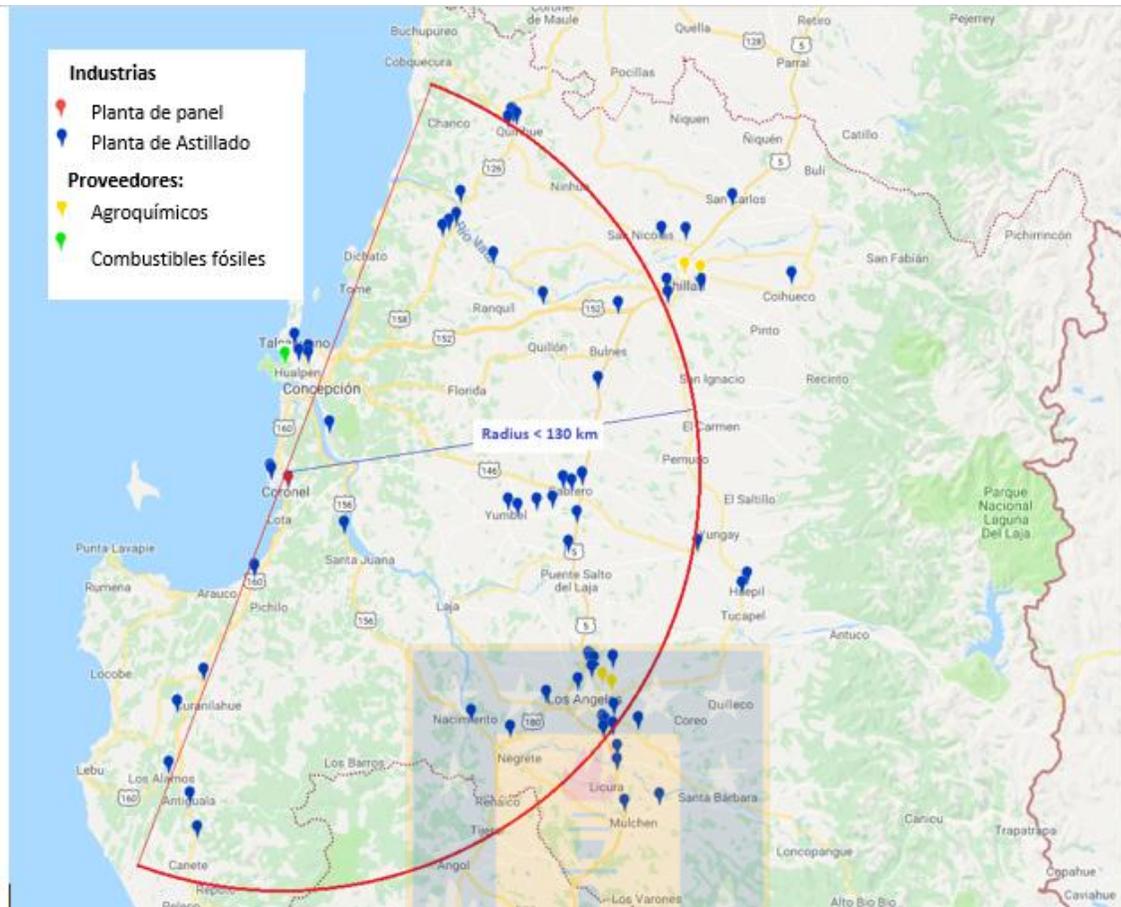
- Transporte de las plántulas desde el vivero hasta la plantación forestal.
- Transporte diésel y agroquímicos hasta plantaciones forestales.
- Transporte trozas de madera hasta planta de astillado.
- Transporte diésel hasta planta de astillado.
- Transporte de corteza de *Eucalyptus s.p.* hasta planta de fabricación de paneles aislantes.
- Transporte de fibra bicomponente, aditivos ignífugo y aditivos antifúngico hasta planta de fabricación de paneles aislantes.
- Transporte diésel planta de fabricación de paneles aislantes.

A continuación, en la tabla 3 se detalla los límites geográficos nacionales e internacionales para la obtención de materias primas necesarias en el sistema de producción. Asimismo se tiene en cuenta la distancia del transporte desde el origen de los proveedores hasta la puerta de la plantación forestal, planta de astillado y proceso fabricación del panel.

Tabla 3: Límites geográficos de las materias primas del proceso de producción.

Materias primas	Tipo de transporte	Origen	Distancias (km)	Proveedor
Fibras sintéticas bicomponente	Barco	Brasil	8500	BASF S.A.
Aditivo ignífugo	Camión	Santiago de Chile	530	AF700 SpA.
Aditivo antifúngico	Camión	Santiago de Chile	34	Clariant Chile Ltda.
Diésel y petróleo	Camión	Concepción	34	ENAP
Pesticida (Glyphosato)	Camión	Los Ángeles	130	Copeval
Fertilizantes*	Camión	Los Ángeles	130	Copeval
Lubricantes	Camión	Los Ángeles	130	Copeval

*Principales distribuidores minoristas de fertilizantes en la Región Biobío (ODEPA, 2010)



Figuras 14

Ilustración 14: Localización de las principales plantas de astillado y la ubicación actual de la planta de panel aislante

Fuente: (Elaboración propia)

3.2.4. Asignación de cargas

La asignación de carga, tiene como objetivo distribuir los impactos ambientales en cada proceso que genere múltiples productos. Dicha distribución de impactos se asocia a las emisiones, recursos, consumo de energía, etc. mediante una relación física por criterios másico, contenido energético o valor económico (ISO 14.040, 2006). En el sitio forestal se generan restos de biomasa tales como: hojas, tocones y ramas, los cuales permanecen en el suelo para descomponerse y entregar nutrientes. Debido a lo que se menciona anteriormente, no se requiere la asignación de cargas ya que los subproductos generados son reutilizados con la finalidad de mejorar la calidad del suelo (Dias & Arroja, 2012; Ñ & Lindholm, 2005)

En este estudio, la planta de astillado involucra como producto principal las astillas y como co-productos los finos y la corteza. Las cargas ambientales distribuidas para este proceso se basaron los principios másicos (Morrison & Golden, 2017). A continuación, se muestra la ecuación de Co-productos para aplicar reglas de asignación de cargas.

$$\text{Asignación de carga} = \frac{M P}{M T} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo:

- M P: Masa Producto o Co-producto en Kg.
- M T: Masa total o la sumas de todos los co-productos y productos en Kg.

La asignación de cargas se basa en criterios másicos de los productos mencionados anteriormente y se distribuyen de la siguiente manera: 84% de astilladas, 5% de finos y 11% corteza.

3.2.5. Inventario del ciclo de vida (ICV)

El sistema principal (Foreground system) corresponde a todos procesos unitarios de la fabricación del panel aislante desde la cuna a la puerta ya que debería existir un control de lo que se produce. En cambio, el sistema de fondo (Background system) corresponde a los procesos que no serán afectados directamente y no existe un control o no existe disponibilidad de donde se producen ciertos materiales o recursos. Se puede apreciar en la tabla 4.

Tabla 4: Sistem Foreground y barckground.

	Etapas	Descripción	Fuentes de los datos	Referencias
Sistem Foreground	Cultivo de rotación corta (SRWC)	El consumo de combustible, fertilizante, pesticida e insecticida fueron obtenidos de un estudio que entrega datos primario de la región del Biobío en Chile. Además, este estudio incluye las emisiones gaseosas generadas en esta etapa forestal.	Primario	Morales <i>et al.</i> , 2015
	Transporte	Se consideró el uso de camiones de EURO3 con capacidad de 16-32 toneladas. Las distancias recorridas se obtuvieron por georreferenciación en google earth para obtener el total de toneladas de kilómetros recorridos (TKM). Las emisiones aire fueron obtenidas de eco-invent.	Secundaria	Eco-invent
	Astillado	La base de datos de los consumo de diesel, bencina, electricidad, madera, astilla, fino y corteza se obtuvieron de los proyectos existentes del servicio de Evaluación Ambiental (SEA) de acceso público. Las emisiones al aire asociada al uso de maquinaria se obtuvo de los factores de emisión para transferencia de material, según se especifica en la DIA del proyecto denominado planta de astillado de madera COMAMO S.A. coronel.	Primaria	SEA,2018
	Panel Aislante	En dicha etapa se considera la recepción de la biomasa, tratamiento, adición de aditivos y fibra bicomponente. Se incluye la generación de vapor para suplir la demanda del proceso.	Primaria	Medición en planta
		Las emisiones al aire asociada a la combustión del gas natural para la obtención del vapor fueron obtenidas de los factores de emisión AP-42 perteneciente a Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)	Secundaria	Factores de emisión AP42 (EPA)
Sistem Barckground	Producción de insumos	Se consideró las emisiones al aire de la fabricación de los siguientes productos: <ul style="list-style-type: none"> - Producción de pesticida - Producción de fertilizante - Producción de insecticida - Producción de combustibles - Producción de Aditivos ignifugo - Producción de Aditivos antifúngico - Producción de Fibras sintéticas bicomponente. 	Secundaria	Ecoinvent
	Consumo de electricidad	Se consideró las emisiones al aire de la matriz energética chilena debido a los requerimientos en las diferentes etapas de la producción del panel aislante.	Primaria	Vega-Coloma and Zaror, 2018

3.2.6. Evaluación de impactos ambientales

Los potenciales impactos serán evaluados mediante el método CML-IA Baseline (version 3.04) (Leiden University, 2016). Este método será implementado en el software SimaPro versión 8.1 para cuantificar las categorías de impactos que se mencionan a continuación: agotamiento de recursos abióticos (ADP), agotamiento de combustibles fósiles (ADP fossil), potencial calentamiento global (GWP), agotamiento de la capa de ozono (ODP), toxicidad humana (HTP), ecotoxicidad del agua dulce (FAETP), ecotoxicidad acuática marina(MAETP), ecotoxicidad terrestre (TETP), acidificación (AP), eutrofización (EP), formación de oxidantes fotoquímicos (POCP) (Arrigoni et al., 2017).

3.2.7. Interpretación

En esta etapa se debe interpretar los resultados obtenidos para identificar los procesos que presentan mayor impacto ambiental y los impactos ambientales que presentan mayor impacto en todo el proceso de fabricación del panel aislante. Otra interpretación que se debe realizar es identificar cuál de los cuatro escenarios es el más conveniente ambientalmente, es decir, cuál de los cuatro paneles compuesto por cuatro densidades presenta mayores ventajas ambientales. Además, se identificaron las etapas dentro del ciclo de vida con las mayores contribuciones por cada categoría de impacto evaluada.

3.3. Análisis Comparativo del panel aislante de corteza de eucalipto con aislantes tradicionales

3.3.1. Comparar ambientalmente el mejor escenario con diferentes paneles tradicionales

Entre los cuatro escenarios evaluados en el objetivo anterior se debe seleccionar el mejor panel aislante en términos ambientales. Enfocado en dos impactos ambientales principalmente: potencial calentamiento global (CO₂ eq.) y agotamiento de combustibles de energía (MJ), debido a que son las categorías que más ampliamente han sido usadas en estudios previos(Ricciardi et al., 2014; Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014; Ardente *et al.*, 2008). Los cuatro escenarios están

conformados por los paneles aislantes con corteza de Eucalyptus s.p. con densidad de 25, 50, 75 y 100 Kg/m³.

Se utilizara estudios efectuados para realizar una comparación ambiental con el mejor panel aislante flexible con Corteza de Eucalyptus s.p. Los materiales utilizados en el reacondicionamiento térmico en techumbre y muros se muestran en la Tabla 5 (Schiavoni et al., 2016 y buratti et al., 2018). Para fines comparativos, se consideró como unidad funcional la misma establecida anteriormente, es decir, la resistencia térmica de cada material igual a **1 m²K/W**. Esta unidad funcional es recomendada para comparar materiales con diferentes propiedades según (Ricciardi et al., 2014). Para ello, es necesario conocer la cantidad en masa de material aislante requerida para garantizar la unidad funcional (resistencias térmicas de 1 m²K/W). La masa de material aislante se determinó en función de sus propiedades constructivas según la expresión mencionada anteriormente (Ecuación 1).

Tabla 5: Cantidad de masa de panel aislante para cada material requerida para la UF de 1 m²K/W.

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	m (kg)	Enfoque y límite del sistema
Poliestireno expandido	35	0,038	1,13	GTGA/ Europeo
Poliuretano expandido	30	0,03	0,9	GTGA/ Europeo
Lana de vidrio	80	0,05	8	GTGA/ Europeo
Lana de roca	25	0,04	1,2	GTGA/ Europeo
Fibras de vidrio	100	0,04	0,8	GTGA/ Europeo
PET reciclado	60	0,037	1,48	GTGA/ Europeo
Corcho	170	0,05	5	GTGA/ Europeo
Fibras de yute	100	0,05	5	GTGA/ Europeo
Fibras de kenaf	40	0,038	1,9	GTGA/ Europeo
Celulosa	30	0,039	2,34	GTGA/ Europeo
Cascara de arroz	170	0,07	11,9	GTGA

*GTGA: Enfoque de la cuna a la puerta.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2. Evaluación técnica del proceso de fabricación del panel aislante

Es fundamental que para cada panel aislante con densidad de 25, 50, 75 y 100 [kg/m³] medir sus propiedades térmicas y verificar su preservación en el tiempo a agentes externos tales como el fuego, humedad y mohos. Los resultados obtenidos se tabularon (tabla 6) destacando que fueron bastante óptimos al comprar con literatura.

El panel aislante con densidad de 100 [kg/m³] presento el valor mayor en conductividad térmica en comparación con las otras densidades e implicando que conduce fácilmente el calor. En caso contrario, el material con mejor característica térmica es panel con densidad de 25 [kg/m³] al presentar valores más bajos conductividad térmica equivalente a 0,045 [W/mK]. La resistencia térmica R100 obtenida para los cuatro escenarios es de 111 – 223 [m²K/W] y según la normativa de la construcción su aplicación en una vivienda puede ser en: muros, pisos y techumbre. Sin embargo, el uso en los muros de una vivienda sirve en cualquiera zonificación térmica desde la 1 hasta la 7 donde los valores máximos alcanzados son 23-154 [m²K/W]. En cambio, la aplicación del panel en techumbres está dada hasta la zona 4 y en pisos corresponde hasta la zona 5 logrando alcanzar el valor máximo de 235 -183 [m²K/W] respectivamente.

Los paneles aislantes con corteza de Eucalyptus s.p. evaluados poseen todos un rendimiento térmico comparable con los paneles existentes y paneles de literatura. Esto se debe a la conductividad térmica similar ya que es ligeramente mayores que los tradicionales (33%) observándose que el poliuretano posee el mejor valor rendimiento (0,028 W/ m K) y le sigue fibra de vidrio (0,036 W/m K); lana de roca (0,037 W/m K); poliestireno (0,037 W/m K) y lana mineral (0,038W/m K). En cambio, al ser comparados con fibras naturales presentan valores muy similares en conductividad térmica (15%) encontrándose paneles desde 0,135 W/m K (caucho) hasta 0,076 W/m K (cáscara de arroz).

La conservación del panel a través del tiempo fueron medidos a través de tres factores: resistencia al avance de llama, resistencia a los mohos y resistencia al vapor de agua. Se obtuvo que el panel aislante era resistente a la llama y mohos y al vapor. Sin embargo, la adición de aditivos ignífugos y antifúngicos es el principal responsable de la conservación del panel aislante. A continuación se muestran los valores obtenidos en la tabla 6.

Tabla 6: Especificación técnica de paneles aislantes flexibles.

Propiedad	Unidad	Valor			
Densidad	Kg/m ³	25	50	75	100
Conductividad térmica	W/ m K	0,045	0,046	0,048	0,049
Difusividad térmica (10⁻⁷)	m ² / s	7,9	4,4	3,0	2,4
Calor específico	J/ kg K	2198			
Espesor	mm	50	80	100	
Resistencia térmica R100	m ² K/ W	111	178	223	
Resistencia al avance de llama		No genera llama			
Resistencia a mohos		0,6 de 10			
Factor de resistencia a la difusión de vapor		5,3 – 5,98			

4.3. Estudio del procesos de fabricación del panel aislante

Para un panel aislante de densidad 25 kg/m³ el cual equivale a una masa de 25 kg, se requiere de 35,2 kg de corteza y 1,06 kg de fibra sintéticas bi-componente. Estandarizando dichos valores por cada 1,13 de panel producido se necesitaran 1,58 kg/fu de corteza, 0,048 kg/fu de fibras sintéticas, 0,0059 kg/fu de aditivo ignifugo y 0,0059 kg/fu aditivo antifungico.

Además, el requerimiento eléctrico total es de 5,28 kWh/kg de panel considerando el proceso completo para fabricar un panel aislante. Las etapas con mayores demandas eléctricas son la formadora y pre-prensa según se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Requerimiento eléctrico de los principales equipos involucrados en la fabricación del panel de 25 kg/m³

Principales equipos	Unidad	Panel flexible
Triturador	kWh/kg de panel	0,18
Molino de martillos	kWh/kg de panel	0,23
Separador	kWh/kg de panel	0,09
Secador	kWh/kg de panel	0,69
Mezclador	kWh/kg de panel	0,79
Formadora y pre-prensa	kWh/kg de panel	0,98
Prensa	kWh/kg de panel	0,16
Dimensionado	kWh/kg de panel	0,30
Manipulación	kWh/kg de panel	0,30
Empaque	kWh/kg de panel	0,10
Transporte neumático	kWh/kg de panel	0,89
Otros	kWh/kg de panel	0,59
Energía eléctrica total	kWh/kg de panel	5,28
	MWh/kg de panel	0,0053

La energía térmica total requerida fue de 5,41 [MJ/kg de panel], el cual es usado principalmente en el funcionamiento del equipo de secado y prensa. Como se muestra en la Tabla 8, el equipo de secado es el proceso que requiere mayores consumos energéticos en términos de calor, en este caso consume 87% del total demandado en proceso (5,41 MJ/kg de panel) El proceso de prensado demanda pequeñas cantidades de calor, representando 12,9% del total. En este proceso, la generación de calor es obtenida mediante una caldera de vapor, la cual usa gas natural como combustible. Para suplir la demanda térmica total del proceso se consumió 0,14 m³ /kg de panel de gas natural.

Tabla 8: Requerimientos de energía térmica de los principales equipos.

Principales equipos	Unidad	Panel flexible
Secador	kJ/kg de panel	4713,72
Prensa	kJ/kg de panel	696,96
Energía térmica total	kJ/kg de panel	5.411
	MJ/kg de panel	5,41

Para el resto de los paneles con densidades de 50, 75 y 100 kg/m³ los valores de los principales consumos energéticos (calor y electricidad), materias primas (cortezas), aditivos (ignífugo, antifúngico, fibras bicomponentes??), combustibles (gas natural) fueron calculados basándonos en los índices de consumos y generación mostrados anteriormente. Las mayores diferencias en consumos para cada panel con diferentes densidades se basaran en los kg de panel fabricado. Como es de esperar, el panel con densidades de 100 kg/m³ muestra los mayores consumos de combustible en transporte, emisiones, electricidad y materias primas representando con un 77% más que para paneles con densidades de 25 kg/m³, respectivamente. Mayor información de las cantidades de las corrientes de entradas

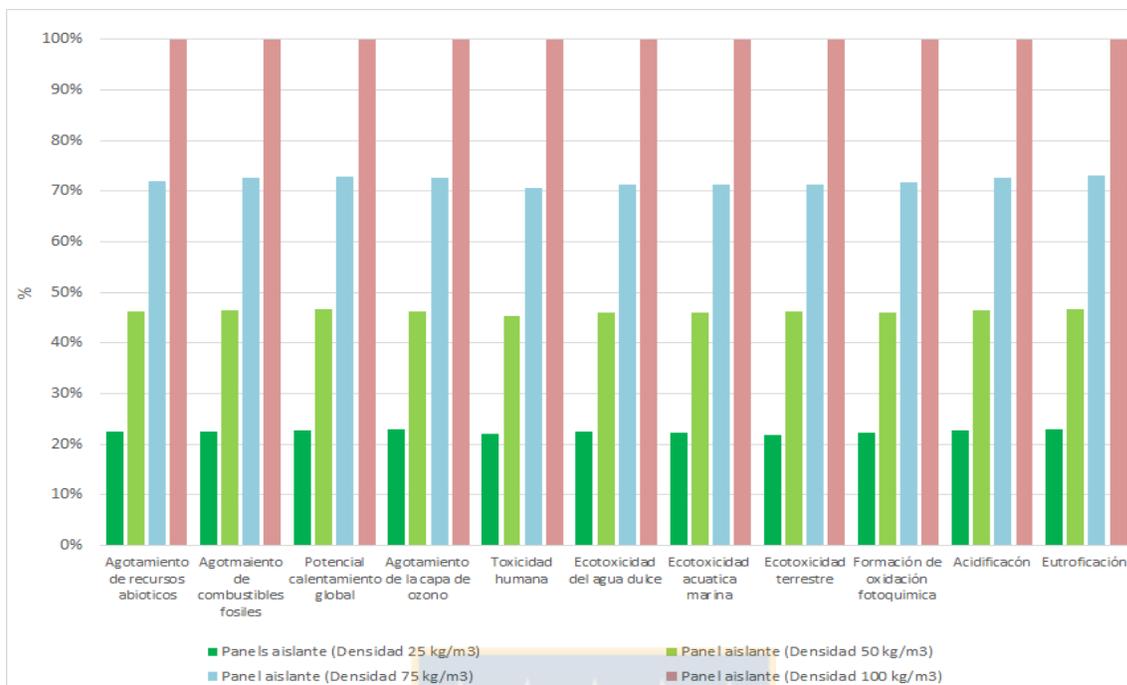
y salidas del proceso para las 4 alternativas de paneles aislantes que se especifican en el Anexo C.

4.4. Evaluación ambiental de los diferentes paneles de corteza de eucalipto

La evaluación de los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de la fabricación del panel aislante de corteza de eucalipto se realizó empleando el método de evaluación de impactos CML-IA baseline. Se realizó un análisis comparativo de los perfiles ambientales de cuatro escenarios de paneles aislantes con diferentes densidades (20, 50, 75 y 100 kg/m³) considerando como base de comparación una resistencia térmica (R) de 1 m²K/W.

El perfil ambiental obtenido para los cuatro escenarios de fabricación de panel aislante de corteza de eucalipto se muestra en la figura 15. El mejor escenario ambientalmente es el panel aislante con densidad de 25 kg/m³, mostrando los menores impactos en todas las categorías de impactos evaluadas. Al comparar estos resultados con el escenario menos favorable [panel de 100 kg/m³] contribuye en una reducción del 78% en todo el perfil ambiental en todos los impactos. Del mismo modo, fabricar un panel aislante con densidad 75 kg/m³ y 50 kg/m³ en vez del panel aislante 100kg/m³ se lograría disminuir los impactos en un promedio de 28% y 54% respectivamente.

Es evidente que un incremento en las densidades del panel incrementa los impactos ambientales, debido a que se requieren mayores cantidades de material para cumplir con la unidad funcional [R=1 m²k/w]. Esto al mismo tiempo, implica que se requieran mayores cantidades de materias primas, aditivos, energía, agroquímicos, combustible durante todo el ciclo de vida de la fabricación del panel. En este caso, el panel de densidad 100 kg/m³ requiere 4,9 kg de material, siendo 76,9%, 53% y, 26,5% mayores con respecto a los paneles con densidades 25, 50 y 75 kg/m³, respectivamente. Es importante destacar, que para todas las alternativas de paneles, se consideraron los mismos rendimientos de eficiencias en los procesos de astillado y fabricación del panel, es por ello que las mayores diferencias en el perfil ambiental entre los paneles se deben principalmente a las diferencias de densidades.



Figuras 15

Ilustración 15: Comparación ambiental entre los paneles aislantes con diferentes densidades. Método: CML-IA baseline V3.02 / World 2000/Caracterización.

En la tabla 9 se detalla la magnitud de las once categorías de impacto para cada escenario compuesto por paneles de 25, 50, 75 y 100 kg/m³. Se puede apreciar que todos los impactos ambientales poseen diferentes unidades de medidas y por esta razón no se puede comparar e identificar que categoría de impacto es más relevante, sin embargo, nos permite comparar las diferentes alternativas de panel para la misma categoría de impacto. Como se explicaba anteriormente, en la medida que se incrementa la masa de panel, mayores serán los requerimientos de recursos durante su ciclo de vida, es por ello, que los impactos potenciales para cada categoría se incrementan con el incremento de la densidad del panel aislante. A partir de aquí, se puede concluir que el panel de corteza de eucalipto menos compatible ambientalmente es el de densidad de 100 kg/m³.

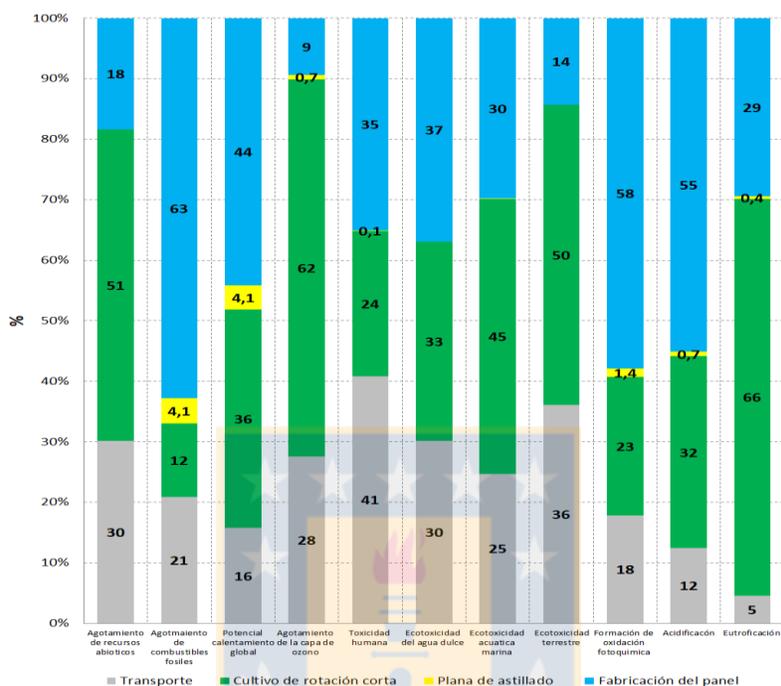
Tabla 9: Perfil ambiental de los cuatro escenarios compuesto por paneles de 25, 50, 75 y 100 kg/m³.

Categoría de impacto	Unidad	25 kg/m³	50 kg/m³	75 kg/m³	100 kg/m³
Agotamiento de recursos abióticos	kg S _{beq}	1,90E-06	3,90E-06	6,09E-06	8,46E-06
Agotamiento de combustibles fósiles	MJ	16,24	33,58	52,53	72,31
Potencial calentamiento global	kg CO _{2eq}	1,35	2,77	4,32	5,93
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 _{eq}	1,42E-07	2,88E-07	4,51E-07	6,22E-07
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB _{eq}	0,24	0,49	0,77	1,09
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB _{eq}	9,13E-02	1,88E-01	2,91E-01	4,08E-01
Ecotoxicidad acuática marina	kg 1,4-DCB _{eq}	263,41	540,90	840,27	1177,99
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB _{eq}	1,01E-03	2,13E-03	3,29E-03	4,62E-03
Formación de oxidación fotoquímica	kg C ₂ H _{4eq}	2,39E-04	4,91E-04	7,66E-04	1,07E-03
Acidificación	kg SO _{2eq}	9,49E-03	1,94E-02	3,03E-02	4,17E-02
Eutrofización	kg PO _{4eq}	5,97E-03	1,22E-02	1,91E-02	2,61E-02

4.5. Evaluación del ciclo de vida de la fabricación del panel aislante

Se llevó a cabo un análisis ambiental de las etapas dentro de la cadena de producción de las cuatro alternativas de panel aislante en la figura 16. Es importante

recordar, que se consideró la misma eficiencia y rendimiento en cada etapa que involucra el ciclo de vida del panel aislante de todas las alternativas estudiadas. Debido a esta consideración es que se presenta solo los resultados del panel aislante con densidad de 25 kg/m³.



Figuras 16

Ilustración 16: Análisis de la contribución de cada etapa del ciclo de vida del panel aislante de 25 kg/m³ con flujo de referencia igual a 1,13 kg y Metodo CML-IA baseline V3.02/World 200/Caracterización.

A continuación se analizará cada categoría de impacto para identificar porque la etapa tiene mayor contribución según el proceso, material o sustancia involucrada:

El agotamiento de recursos abióticos (AD) se debe al uso de recursos principalmente minerales. Estos recursos abióticos fueron utilizados principalmente en la etapa cultivo de rotación corta con un 51% de participación con respecto al total de 1,9 E⁻⁶ (kg Sb_{eq}/fu.). En particular, se utilizaron grandes cantidades de recursos en la fabricación de: fertilizante diamonium (61%); insecticida cyperkill (19%); glyphosate (9%) y diesel (7%). Además, un 30% corresponde a la etapa de transporte debido a la producción del combustible usado para transportar grandes volúmenes de biomásas.

El uso de petróleo, gas natural y carbón son las principales razones para generar impacto sobre el **agotamiento de combustibles fósiles (ODP)**. El consumo de energía total del ciclo de vida del panel aislante con 25kg/m³ es de 16,2 MJ/fu. La etapa de fabricación del panel aislante participa con un 63%, debido principalmente a los requerimientos de gas natural y fibra bicomponente. Donde el gas natural representa el 54% del total de dicha categoría de impacto y el bicomponente aproximadamente 40%. En este proceso, el gas natural es utilizado para suplir los requerimientos de vapor en los proceso de prensado en la etapa de fabricación de panel. Además, la fabricación de la fibra bi-componente a pesar que se requiere una pequeña cantidad está compuesta por polietileno y polipropileno, las cuales se originan a partir del petrolero; es por ello, sus altas repercusiones ambientales. Por último, la etapa del transporte contribuye con un 21% del total, el cual se debe a las necesidades de combustibles para transportar la biomasa desde las plantaciones hasta la planta de astillado. Una alternativa para disminuir los impactos ambientales asociado al combustible de gas natural para la generación de vapor mediante la sustitución por combustibles menos contaminantes, tales como la biomasa.

Las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) totales ascienden a 1,35 CO₂ eq./fu. Las etapas con mayores implicaciones sobre dicha categoría de impacto son fabricación del panel aislante (44%); cultivo de rotación corta (36%) y transporte (16%). Las emisiones que se generan en la primera etapa, se debe a los combustibles fósiles usados en la producción del panel (64%) y fibra bi-componente (21%). Además, el CO₂ es la emisión que tiene mayor aporte con un 78% y le sigue el metano con un 22% de las emisiones totales en la etapa de fabricación del producto en estudio. Por otro lado, el cultivo de rotación corta que representa un 36% genera mayor emisión de N₂O (76%) y CO₂ (24%) principalmente derivados por el uso de maquinarias forestales y agroquímicos. En síntesis los resultados obtenidos, existe una relación directamente proporcional entre las emisiones de GEI con el consumo de combustibles fósiles.

Los compuestos que contienen Hidroclorofluorocarburos (HCFC) y clorofluorocarbonos (CFC) generan como impacto el **agotamiento de la capa de**

ozono (ODP) que para este caso de estudio se contabilizó con un total de $1,42 \text{ E}^{-7} \text{ kgCFC}_{\text{eq}}/\text{fu}$. El cultivo de rotación corta contribuye con un 62% y etapa de transporte (28%)

Las categorías de impacto **ecotoxicidad acuática en agua dulce (FAETP)**, **ecotoxicidad acuática marina (MAETP)** y **ecotoxicidad terrestre (TETP)** se expresan con la misma unidad kilogramos 1,4 dichlorobenzene equivalente ($1,4\text{-DB}_{\text{eq}}/\text{fu}$). Las siguientes etapas: fabricación de panel aislante, cultivo de rotación corta y transporte tienen una contribución bastante importante en las categorías de impacto **FAETP y MAETP**. Cabe destacar que los porcentajes no son los mismos ya que la FAETP se representa con un 37%, 33% y 30% según el orden de las etapas mencionado anteriormente. Por otro lado, MAETP tienen una mayor contribución en el cultivo de rotación corta (45%) generando una disminución en la fabricación del panel aislante y transporte equivalentes a un 30% y 25% respectivamente. Es importante destacar que los productos que generan mayor aportes en ambas categorías de impactos son: la fibra bi-componente, aditivo antifúngico, fertilizante diamonion y glifosato.

La ecotoxicidad terrestre (ET) tiene una carga ambiental total de $1,01 \text{ E}^{-3} \text{ kg } 1,4\text{-DB}_{\text{eq}}/\text{fu}$. Según las etapas del ciclo de vida el cultivo de rotación corta contribuyen con un 50% y la principal razón son las emisiones asociadas al proceso de fertilización. Este último representa un 84% del total de dichas categorías de impactos. Por otro lado, el transporte y la fabricación del panel aportan con un 14% y 36% respectivamente. Específicamente, la contribución de la fabricación del panel se debe a la producción del aditivo antifúngico (51%) y fibra bicomponente (35%).

El monóxido de carbono y el dióxido de azufre son los contaminantes que tienen los mayores aportes sobre la **formación de oxidantes fotoquímicos (POCP)**. En este caso, el impacto total en todo el ciclo de vida asciende a $2,39 \text{ kg C}_2\text{H}_4\text{eq}/\text{fu}$. La fabricación del panel aislante presentan las mayores contribuciones, siendo del 58%. Este comportamiento se debe a la producción del panel aislante (36%), fibra bicomponente (27%) y gas natural (19%). En cambio, el cultivo de rotación corta

con una repercusión del 23% se debe al fertilizante diamonion (42%) y al consumo de combustibles fósiles en las maquinarias forestales (22%).

La etapa de fabricación del panel aislante genera el mayor aporte a la categoría de impacto denominada **acidificación (AP)** atribuyéndole un 55% del total de emisiones 9,49 kgSO₂ eq /fu debido a las emisiones de NO_x a la atmosfera, las cuales representan un 82% del total de dicha categoría. El cultivo de rotación corta genera emisiones de NH₃ (56%), SO₂ (25%) y NO_x (17%) que sumados aportan con un 32% de las emisiones totales del ciclo de vida. Es importante destacar que en ambas etapas las cargas ambientales se atribuyen al producir principal: el panel aislante y el trozo de madera que incluye la corteza de eucaliptus s.p.. La emisiones generadas en el transporte (12%) y planta astillado (0,7%) son principalmente asociadas a las emisiones de SO₂ y NO_x respectivamente. El transporte (12%) genera en su totalidad emisiones de SO₂ y la planta astillado (0,7%) es NO_x el que se emite en grandes cantidades.

El cultivo de rotación corta es el principal causante con un aporte de un 66% en la **eutrofización** (5.97 E⁻³ kg PO₄eq/fu debido a las emisiones de nitrato emitidos en el proceso de fertilización. La segunda etapa de mayores aportes es el panel aislante con un 29%, destacándose el gran aporte de la fibra bi-componente (32%). En cambio en el transporte fue el óxido de nitrógeno.

En conclusión, las etapas que presentan mayores contribuciones en el perfil ambiental del proceso de fabricación del panel en todo su ciclo de vida son, la etapa de silvicultura (cultivo de rotación corta) y fabricación de panel aislante. Para reducir los impactos ambientales asociados a la etapa de silvicultura, una posible solución es sustituir los fertilizantes inorgánicos por orgánicos, evitando de esta manera menores impactos para su producción y emisiones en la fase de aplicación. En cuanto a la producción del panel aislante, se pudiera disminuir los impactos asociados a dicha etapa, sustituyendo el combustible gas natural por combustibles renovables (biomasa). Por otra parte, se pudiera evaluar la posibilidad de usar fibras bicomponente con menores impactos en su producción, sin embargo, se requerirá

estudios de laboratorio para estudiar técnicamente su factibilidad sobre las propiedades del panel.

4.6. Análisis comparativo entre diferentes aislantes térmicos

Según literatura, las categorías de impactos que comúnmente se utilizan para evaluar y comparar los materiales aislantes son, el potencial de calentamiento global (GWP_{100}) y demanda acumulada de energía (CED, Buratti et al., 2018; Schiavoni, D'Alessandro, Bianchi, & Asdrubali, 2016)

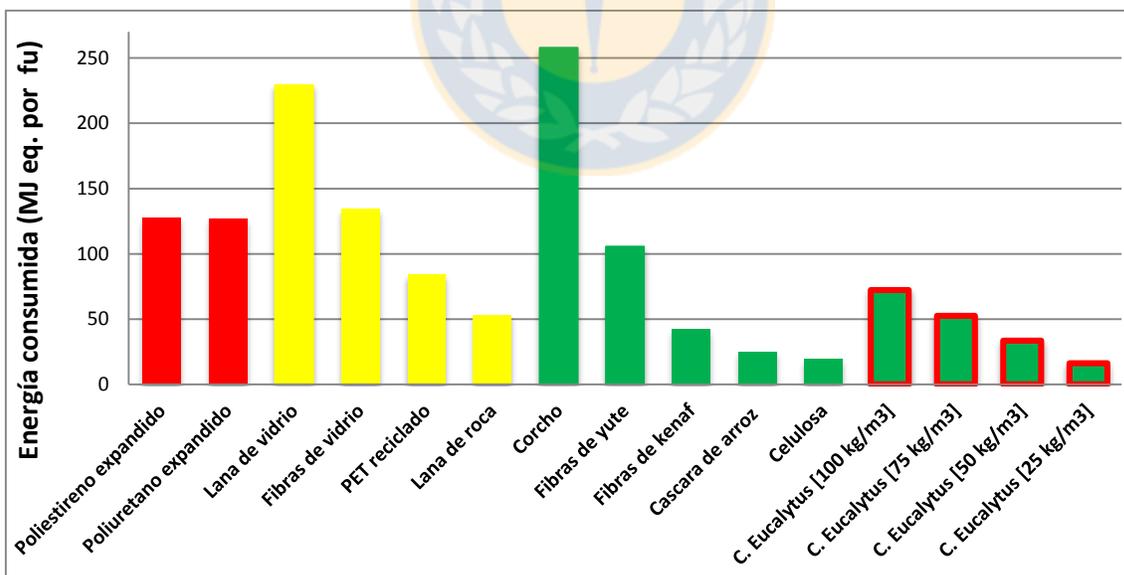
(Ardente *et al.*, 2008; Schiavoni *et al.*, 2016; Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014; (Rodríguez, 2015); Densley Tingley, Hathway and Davison, 2015). Señalan que es por ello, que se realiza un análisis comparativo del panel aislante propuesto (corteza de eucalipto) con aislantes convencionales existentes actualmente en el mercado de la construcción en Chile (CDT, 2010; INN, 2007) y materiales no convencionales reportados en la literatura, haciendo énfasis en los $kgCO_2_{eq}$ y los MJ de energía consumido por kg de material aislante (f.u.) requeridos para garantizar que la resistencia térmica de cada material sea de $1 m^2K/W$ para un área de $1 m^2$.

En términos de consumos de energía demandado por cada tipo de material aislante, el mayor consumo requerido son los paneles aislantes con corcho y la lana de vidrio entre 258 -229 MJeq/f.u, respectivamente según se muestra en la Figura 17. En cambio, el panel aislante que requiere menor consumo de energía de todos los materiales inorgánicos es lana de roca (53,09 MJeq/f.u). Esto se debe, al origen del material, baja densidad y flujo de referencia.

Los materiales de origen de combustibles fósiles presentan los mayores requerimientos de combustibles, tales son los materiales obtenidos de poliestireno y lana de vidrio. Sin embargo, los aislantes derivados de fibras naturales, tales como el corcho y fibra de yute contienen mayores energías involucradas que los de origen fósil. Estas diferencias se pueden explicar por las elevadas demandas de energía en las fases de cultivo de la biomasa. Además, es importante aclarar que los límites geográficos constituyen un factor clave en el transporte de la biomasa, donde esta

etapa puede ser significativa dentro del ciclo de vida del proceso, repercutiendo directamente sobre los consumos de combustibles.

Comparando los paneles aislantes derivados de fibras naturales, el panel de corteza de Eucalyptus s.p. con densidad de 25 kg/m³ presentan las menores demandas energéticas (16,24 MJ) en comparación con cáscara de arroz (25 MJ), celulosa (19,4 MJ), fibra de kenaf (42,3 MJ), fibra de yute (105,5 MJ) y corcho (258,0 MJ). Además, esta alternativa presenta menores emisiones de carbono que el textil reciclado, representando una disminución del 8% de las emisiones de GEI. Por lo tanto, este panel aislante constituye una alternativa prometedora como material aislante por sus bajos consumos energéticos. Sin embargo, en la medida que se incrementa la densidad del panel, se incrementan al mismo tiempo los requerimientos energéticos, es por ello, que las mayores energías involucradas en la fabricación del panel de eucalipto le corresponde a densidades superiores a 75 kg/m³. En general, los paneles de eucalipto son competitivos, sin embargo, las alternativas con mayores ventajas ambientales corresponden a densidades de 25 y 50 kg/m³.

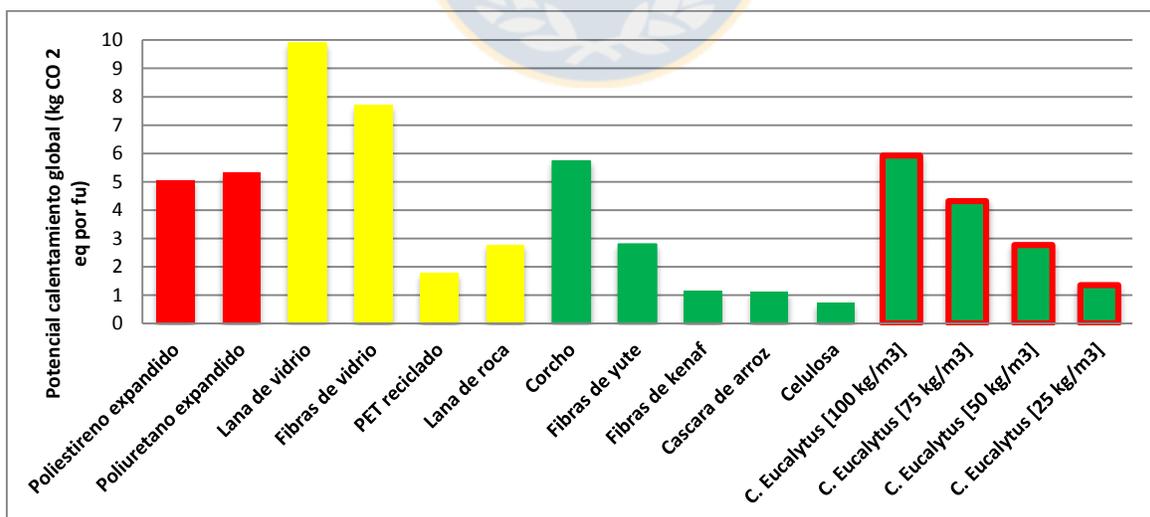


Figuras 17

Ilustración 17: Energía consumida expresada en términos de MJ eq por fu para diferentes paneles aislantes.

Fuente: (Ardente *et al.*, 2008; Schiavoni *et al.*, 2016; Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014; Rodríguez, 2015; Densley Tingley, Hathway and Davison, 2015)

Haciendo la comparación en términos de emisiones de carbonos, los paneles fabricados con materiales orgánicos e inorgánicos que presentaron las menores emisiones fueron: celulosa (0,73 kg CO_{2eq}/fu), cáscara de arroz (1,1 kg CO_{2eq}/fu), fibra de kenaf (1,13 kg CO_{2eq}/fu) y corteza de Eucalyptus (1,4 kg CO_{2eq}/fu). Las emisiones de carbono generadas para los paneles aislantes de corteza de Eucalyptus s.p (1,4-5,9 kg CO_{2eq}/fu) son comparables con los materiales de origen natural (0,2-5,7 kg CO_{2eq}/fu) (corcho, fibra de jute y cáscara de arroz). En este caso, el incremento de la densidad en el panel de eucalipto lo hace menos competitivo en términos de emisiones GEI. Los paneles con densidades superiores a 75 kg/m³ muestran emisiones superiores a los paneles de origen natural. Este comportamiento se debe a los mayores requerimientos de combustibles fósiles en comparación con el mismo panel pero con densidades inferiores a 50 kg/m³. En este sentido, los consumos de combustibles para paneles con densidades superiores a 75 kg/m³ son 36% veces superior a los paneles menores de 50 kg/m³. Las diferencias de los valores de los consumos de energías y emisiones de carbono para los paneles comparados se deben a las diferencias en términos de los límites del sistema, eficiencias de los procesos involucrados, regla de asignación de cargas usadas, entre otros factores.



Figuras 18

Ilustración 18: Potencial de calentamiento global expresado kg CO₂ eq por fu para diferentes aislantes.

Fuente: (Ardente et al., 2008; Schiavoni et al., 2016; Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014; Rodríguez, 2015; Densley Tingley, Hathway and Davison, 2015)

5. CONCLUSIONES

En esta investigación se informa sobre los impactos ambientales de un nuevo panel aislante a partir de un subproducto de la industria forestal. Se enfoca en una planta de astillado para darle un valor agregado a lo que actualmente es un residuo, sin embargo, la materia prima se puede obtener de otras empresas forestales. En los últimos años, se ha incrementado el área de plantaciones de *Eucalyptus s.p.* en especial en la primera región forestal de Chile. Del mismo modo iría incrementando la corteza de *Eucalyptus s.p.* Por lo tanto, esta biomasa presenta un potencial para la fabricación de paneles aislantes térmicos debido a sus buenos rendimientos térmicos.

El panel proveniente de corteza de eucalipto presentan buenos comportamientos térmicos, esto se ve evidenciado en su conductividad (0,045- 0,049 W/mk), siendo ligeramente mayores que los tradicionales (33%). En cambio, comparados con fibras naturales presentan comparables conductividad térmica (15%). Además, el panel aislante propuesto presenta buena resistencia a la llama (no genera llama), paso del vapor (μ : 4- 7) y a los hongos (sin pérdidas de peso por pudrición), garantizando su durabilidad y estabilidad. Las fibras naturales poseen desventajas ya que su comportamiento ante al fuego genera problemas de seguridad y humos tóxicos. Siendo la principal razón el uso de aditivos ignífugos en la fabricación obteniéndose resultados favorables. Asimismo, se agregó aditivos fungicidas con la finalidad de prevenir aparición de hongos y termitas. Por lo tanto, el material no presenta malos rendimientos térmicos y ambientales causados por: fuego, hongos y termitas.

Los resultados demuestran que el panel aislante con densidades de 25 kg/m³ presenta los menores impactos ambientales para todas las categorías de impactos evaluadas, mostrando una reducción del 48, 73 y 77% con respecto a los paneles con densidades 50, 75 y 100 kg/m³. Estos resultados se deben a los menores requerimientos de recursos, insumos, combustibles y agroquímicos durante toda su cadena de producción. La etapa de fabricación de panel muestra las mayores contribuciones para las categorías de impactos agotamiento de recursos fósiles

(63%), calentamiento global (45%), oxidantes fotoquímicos (58%) y acidificación (55%). Este comportamiento se asocia a los impactos ambientales derivados de la producción de la fibra bi-componente, aditivos y extracción del combustible (gas natural). En cambio, la silvicultura muestra sus mayores perfiles ambientales para el agotamiento de recursos abióticos (51%), agotamiento capa de ozono (62%), ecotoxicidad (49%) y eutrofización (66%), principalmente asociados a la producción de fertilizantes y pesticidas.

El análisis comparativo con aislantes tradicionales (poliuretano, polipropileno, lana de vidrio, etc.) y no tradicionales derivados de fibras naturales (kenaf, cáñamo, cáscara de arroz, fibra de yute, etc.) muestra resultados favorables para los paneles propuestos. Los paneles de fibra de eucalipto (1.4-5.9 kgCO₂eq/u.f. y 16-72 MJ/u.f.) presentan valores competitivos en términos de consumos energéticos y emisiones de carbono que los paneles no tradicionales (1.1-5.8 kgCO₂eq/u.f. y 25-258 MJ/u.f.) y valores inferiores que los tradicionales (5.3-9.9 kgCO₂eq/u.f. y 123-229 MJ/ u.f.). En este caso, los paneles con densidades 25 y 50 kg/m³ son las alternativas más prometedoras desde el punto de vista de los consumos de energía y emisiones de carbono. En general, los resultados sugieren que el panel usando corteza de eucalipto constituye una alternativa factible desde el punto de vista ambiental para aplicaciones sustentables en el sector de la construcción.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 5_ATSM 4986-03_Retardancia a la llama.pdf. (s. f.).
2. Aditya, L., Mahlia, T. M. I., Rismanchi, B., Ng, H. M., Hasan, M. H., Metselaar, H. S. C., ... Aditya, H. B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(August 2015), 1352–1365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>
3. Ahmad, M., Zhao, Z., & Li, H. (2019). Science of the Total Environment Revealing stylized empirical interactions among construction sector , urbanization , energy consumption , economic growth and CO 2 emissions in China. *Science of the Total Environment*, 657, 1085–1098. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.112>
4. Allouhi, A., Kousksou, T., Jamil, A., El Rhafiki, T., Mourad, Y., & Zeraouli, Y. (2015). Economic and environmental assessment of solar air-conditioning systems in Morocco. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 770–781. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.044>
5. Andrade, R. M. E. (2007). Variación de la conductividad térmica con la humedad en materiales de construcción. *Descarga de datos a alta velocidad con HSPA sobre UMTS*, 1–118.
6. Anuario Estadístico de Energía. (2016).
7. Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2008). Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy and Buildings*, 40(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.12.009>
8. Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., & Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, 114, 307–332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
9. Ashouri, M., Astarai, F. R., Ghasempour, R., Ahmadi, M. H., & Feidt, M. (2016). Optimum insulation thickness determination of a building wall using exergetic life cycle assessment. *Applied Thermal Engineering*, 106, 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.190>
10. Auffhammer, M., & Mansur, E. T. (2014). Measuring climatic impacts on energy consumption: A review of the empirical literature. *Energy Economics*, 46, 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.04.017>
11. Baniassadi, A., Sajadi, B., Amidpour, M., & Noori, N. (2016). Economic optimization of PCM and insulation layer thickness in residential buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 14, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.01.008>
12. Barrera, D. A. H. (2009). Implementación de soluciones constructivas para el mejoramiento de la envolvente térmica, y otros aspectos que influyen en la calidad y habitabilidad de la vivienda, 1–35.
13. Basri, Z. (2016). No Titled. *Mmum*, 2016.

14. Bío-bío, U., V, H. N., & G, I. W. (s. f.). Materiales de construcción y aislación - Determinación de la permeabilidad al vapor de agua (humedad). *Materiales de Construcción*.
15. Blengini, G. A., & Di Carlo, T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 42(6), 869–880. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.009>
16. Braulio-Gonzalo, M., & Bovea, M. D. (2017). Environmental and cost performance of building's envelope insulation materials to reduce energy demand: Thickness optimisation. *Energy and Buildings*, 150, 527–545. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.005>
17. Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Lopez, G. A., & Ricciardi, P. (2016). Sustainable Panels with Recycled Materials for Building Applications: Environmental and Acoustic Characterization. *Energy Procedia*, 101(September), 972–979. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.123>
18. Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Merli, F., & Ricciardi, P. (2018). Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials. *Construction and Building Materials*, 171, 338–349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089>
19. CDT, T. D. C. (2010). Energy end uses and conservation supply curve study in the residential sector, —404. Recuperado a partir de http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/Minerg/Usos_finales_y_curva_de_oferta_de_conservación_de_la_energía_en_el_sector_de_residencial_de_Chile.pdf
20. Cetiner, I., & Shea, A. D. (2018). Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. *Energy and Buildings*, 168, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.019>
21. CONAF. (2012). Chile Forestal, *Rev. N°359*, 25,26.
22. De, A. T. C., Por, S., Energéticos, R., Cano, M. P., & Avia, J. S. (2010). Trabajo Fin De Grado Aula 4 Tfg. Recuperado a partir de http://oa.upm.es/47071/1/TFG_Palomo_Cano_Marta.pdf
23. Densley Tingley, D., Hathway, A., & Davison, B. (2015). An environmental impact comparison of external wall insulation types. *Building and Environment*, 85, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.021>
24. Dias, A. C., & Arroja, L. (2012). Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal, 37, 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.056>
25. Dodoo, A., Gustavsson, L., & Sathre, R. (2011). Building energy-efficiency standards in a life cycle primary energy perspective. *Energy and Buildings*, 43(7), 1589–1597. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.002>
26. Dong, C., Dong, X., Jiang, Q., Dong, K., & Liu, G. (2018). What is the probability of achieving the carbon dioxide emission targets of the Paris Agreement? Evidence from the top ten emitters. *Science of the Total*

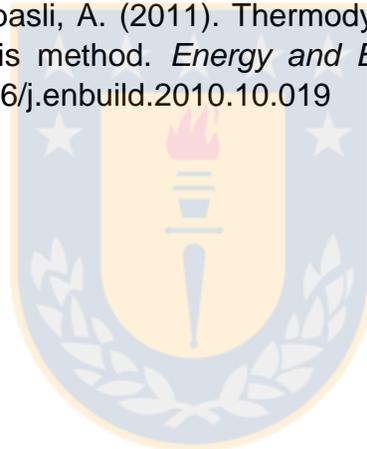
- Environment*, 622–623(December 2015), 1294–1303.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.093>
27. Dovie, D. B. K. (2019). Case for equity between Paris Climate agreement's Co-benefits and adaptation. *Science of the Total Environment*, 656, 732–739.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.333>
 28. Droutsas, K. G., Kontoyiannidis, S., Dascalaki, E. G., & Balaras, C. A. (2014). Ranking cost effective energy conservation measures for heating in Hellenic residential buildings. *Energy & Buildings*, 70, 318–332.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.029>
 29. E2BIZ, C., Energ, C., & Ambiente, M. (2017). “Estudio Escenarios de Usos Futuros de la Electricidad” Capítulos Transporte y Residencial Resumen Ejecutivo.
 30. ENCE, G. empresarial. (2009). La gestión forestal sostenible y el eucalipto, 74. Recuperado a partir de https://www.ence.es/pdf/El_Eucalipto.pdf%0A
 31. Energía, M. de. (2015). Energy 2050. *Bulletin of the Atomic Scientists*.
<https://doi.org/10.2968/056004010>
 32. Energía, L., & Familiar, E. P. (s. f.). Manual de (Re) Acondicionamiento.
 33. Fuentealba, C., Vega, J., Gonzáles, J.; Vallejos, J. (2017). Informe de prefactibilidad técnico- económica. Panel aislante térmico en base a fibras de corteza de Eucalyptus sp.
 34. González, N., Elissetche, J., Pereira, M., & Fernández, K. (2017). Extraction of polyphenols from Eucalyptus nitens and Eucalyptus globulus: Experimental kinetics, modeling and evaluation of their antioxidant and antifungal activities. *Industrial Crops and Products*, 109(June), 737–745.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.038>
 35. Guevara Garrido, J. P. (2015). Reacondicionamiento térmico de viviendas: Criterios de intervención integral, 125.
 36. Guo, X., & Chatellier, P. (2019). Ac ce p te d cr t. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101533>
 37. Hans, J. (2015). Análisis del ciclo de vida. *Metodología Del Análisis Del Ciclo De Vida*, 37. Recuperado a partir de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle>.
 38. Hollberg, A., & Ruth, J. (2016). LCA in architectural design—a parametric approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 943–960.
<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1065-1>
 39. Huang, Z., Sun, Y., & Musso, F. (2018). Hygrothermal performance of natural bamboo fiber and bamboo charcoal as local construction infills in building envelope. *Construction and Building Materials*, 177, 342–357.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.071>
 40. IEA. (2017). WEO 2017 Chapter 1: Introduction and scope. *IEA: World Energy Outlook*, 33–61. <https://doi.org/10.1787/weo-2017-en>
 41. IEA, & AIE. (2018). World Energy Outlook 2018. <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>
 42. li, C., & Del, D. (2013). 2 capítulo ii: descripción del proyecto.

43. Isaac, M., & van Vuuren, D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37(2), 507–521. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051>
44. Karami, P., Al-Ayish, N., & Gudmundsson, K. (2015). A comparative study of the environmental impact of Swedish residential buildings with vacuum insulation panels. *Energy and Buildings*, 109, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.031>
45. Kymäläinen, H. R., & Sjöberg, A. M. (2008). Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*, 43(7), 1261–1269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>
46. La Rosa, A. D., Recca, A., Gagliano, A., Summerscales, J., Latteri, A., Cozzo, G., & Cicala, G. (2014). Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite solutions for building applications. *Construction and Building Materials*, 55, 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.054>
47. Leth-Petersen, S., & Togeby, M. (2001). Demand for space heating in apartment blocks: Measuring effects of policy measures aiming at reducing energy consumption. *Energy Economics*, 23(4), 387–403. [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(00\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(00)00078-5)
48. Li, J., Yang, L., & Long, H. (2018). Climatic impacts on energy consumption: Intensive and extensive margins. *Energy Economics*, 71, 332–343. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.03.010>
49. López-Rodríguez, M. A., Santiago, I., Trillo-Montero, D., Torriti, J., & Moreno-Munoz, A. (2013). Analysis and modeling of active occupancy of the residential sector in Spain: An indicator of residential electricity consumption. *Energy Policy*, 62, 742–751. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.095>
50. MINVU. (2014). ED11_Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Termico., 1434.
51. Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuña, E., Mola-Yudego, B., & González-García, S. (2015). Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 99, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.085>
52. Morrison, B., & Golden, J. S. (2017). Life cycle assessment of co-firing coal and wood pellets in the Southeastern United States. *Journal of Cleaner Production*, 150, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.026>
53. Muñoz, G., Ariztia, F. D., & Campusano, D. (2007). Facultad de ciencias físicas y matemáticas.
54. Nathali, B., Khan, M., & Han, K. (2018). Towards sustainable smart cities : A review of trends , architectures , components , and open challenges in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 38(August 2017), 697–713. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.053>
55. Nejat, P., Jomehzadeh, F., Mahdi, M., & Gohari, M. (2015). A global review

- of energy consumption , CO 2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO 2 emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 843–862. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>
56. ODEPA. (2010). Estudio de Diagnóstico de Mercado y Estudio de la Cadena de Comercialización de Fertilizantes en Chile. Informe final.
 57. Oficial, N. C. (2008). Aislación térmica - Método para la determinación de la conductividad térmica en estado estacionario por medio del anillo de guarda.
 58. Oh, T. H., & Chua, S. C. (2010). Energy efficiency and carbon trading potential in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2095–2103. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.029>
 59. Olivieri, F., Grifoni, R. C., Redondas, D., Sánchez-Reséndiz, J. A., & Tascini, S. (2017). An experimental method to quantitatively analyse the effect of thermal insulation thickness on the summer performance of a vertical green wall. *Energy and Buildings*, 150, 132–148. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.068>
 60. Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., & Masjuki, H. H. (2011). A review on energy scenario and sustainable energy in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.043>
 61. Özel, G., Açıkkalp, E., Görgün, B., Yamik, H., & Caner, N. (2015). Optimum insulation thickness determination using the environmental and life cycle cost analyses based entransy approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 11, 87–91. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.06.004>
 62. Pablo-Romero, M. del P., Pozo-Barajas, R., & Yñiguez, R. (2017). Global changes in residential energy consumption. *Energy Policy*, 101(April 2016), 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.032>
 63. Paiho, S., & Saastamoinen, H. (2018). How to develop district heating in Finland? *Energy Policy*, 122(July), 668–676. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.025>
 64. Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>
 65. Pastén, C. (2012). Chile, energía y desarrollo. *Obras y proyectos*, (11), 28–39. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132012000100003>
 66. Quintana, A., Alba, J., del Rey, R., & Guillén-Guillamón, I. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers. *Journal of Cleaner Production*, 185, 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.042>
 67. Radhi, H. (2009). Can envelope codes reduce electricity and CO2 emissions in different types of buildings in the hot climate of Bahrain? *Energy*, 34(2), 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.12.006>
 68. Ricciardi, P., Belloni, E., & Cotana, F. (2014). Innovative panels with recycled

- materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment. *Applied Energy*, 134, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.112>
69. Ricci, R., Besalduch, L. A., Galatioto, A., & Ciulla, G. (2016). Thermal characterization of insulating materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(June 2017), 1765–1773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.057>
70. Rivero Nogueiras, V. (2016). Análisis medioambiental de los aislamientos térmicos en la construcción. Recuperado a partir de <http://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/17490>
71. Rodríguez, M. V. (2015). Materiales aislantes sostenibles. *Universidad De Extremadura Escuela Politécnica*, 1(1), 1–168. Recuperado a partir de [http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/4159/TFGUEx_2015_Velazquez_Rodriguez.pdf?sequence=1](http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/4159/TFGUEx_2015_Velazquez_Rodriguez.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/4159/TFGUEx_2015_Velazquez_Rodriguez.pdf?sequence=1)
72. Saidur, R., Masjuki, H. H., & Jamaluddin, M. Y. (2007). An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia. *Energy Policy*, 35(2), 1050–1063. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.02.006>
73. Salari, M., & Javid, R. J. (2016). Residential energy demand in the United States: Analysis using static and dynamic approaches. *Energy Policy*, 98, 637–649. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.041>
74. Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988–1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
75. Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819–1835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>
76. Teshnizi, Z., Pilon, A., Storey, S., Lopez, D., & Froese, T. M. (2018). Lessons Learned from Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of Two Residential Towers at the University of British Columbia. *Procedia CIRP*, 69(May), 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.121>
77. Uygunoğlu, T., Özgüven, S., & Çalış, M. (2016). Effect of plaster thickness on performance of external thermal insulation cladding systems (ETICS) in buildings. *Construction and Building Materials*, 122, 496–504. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.128>
78. Vega-Coloma, M., & Zaror, C. A. (2018). Environmental impact profile of electricity generation in Chile: A baseline study over two decades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(March), 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.058>
79. Xiang-Li, L., Zhi-Yong, R., & Lin, D. (2015). An investigation on life-cycle

- energy consumption and carbon emissions of building space heating and cooling systems. *Renewable Energy*, 84, 124–129. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.024>
80. Xing, Y., Hewitt, N., & Griffiths, P. (2011). Zero carbon buildings refurbishment - A Hierarchical pathway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3229–3236. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.020>
81. Yang, L., Zmeureanu, R., & Rivard, H. (2008). Comparison of environmental impacts of two residential heating systems. *Building and Environment*, 43(6), 1072–1081. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.007>
82. Yohanis, Y. G., Mondol, J. D., Wright, A., & Norton, B. (2008). Real-life energy use in the UK : How occupancy and dwelling characteristics affect domestic electricity use, 40, 1053–1059. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.09.001>
83. Yu, Z., Fung, B. C. M., Haghghat, F., Yoshino, H., & Morofsky, E. (2011). A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption. *Energy & Buildings*, 43(6), 1409–1417. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.002>
84. Yucer, C. T., & Hepbasli, A. (2011). Thermodynamic analysis of a building using exergy analysis method. *Energy and Buildings*, 43(2–3), 536–542. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.019>



ANEXOS

Anexo A: Reglamentaciones técnicas establecidas para Chile

Tabla A1. Se establece los valores máximos de transmitancia térmica (U) y valores mínimos de resistencia térmica (RT) para techumbre, muros y pisos ventilados por zona térmica en Chile.

	Techumbre		Muros		Pisos Ventilados	
	U	RT	U	RT	U	RT
Zona térmica	W/ m2 K	m2 K/ W	W/ m2 K	m2 K/ W	W/ m2 K	m2 K/ W
Zona 1	0,84	1,19	4	0,25	3,6	0,28
Zona 2	0,6	1,67	3	0,33	0,87	1,15
Zona 3	0,47	2,13	1,9	0,53	0,7	1,43
Zona 4	0,38	2,63	1,7	0,59	0,6	1,67
Zona 5	0,33	3,03	1,6	0,63	0,5	2
Zona 6	0,28	3,57	1,1	0,91	0,39	2,56
Zona 7	0,25	4	0,6	1,67	0,32	3,13

Fuente: Manual de aplicación reglamentación térmica. O.G.U.C. Art. 4.1.10 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo).

Tabla A2. Exigencias mínimas de R100 para elementos de la envolvente térmica de viviendas, según zona térmica.

	Techumbre	Muros	Pisos Ventilados
	R100	R100	R100
Zona térmica	m2 k/ W	m2 k/ W	m2 k/ W
Zona 1	94	23	23
Zona 2	141	23	98
Zona 3	188	40	126
Zona 4	235	46	150
Zona 5	282	50	183
Zona 6	329	78	239
Zona 7	376	154	295

Fuente: Manual de aplicación reglamentación térmica. O.G.U.C. Art.

Anexo B: Técnicas y expresiones para determinar las propiedades térmicas del panel aislante

1. Resistencia al avance de la llama

Un aislante térmico de buena calidad, debe presentar en sus propiedades resistencia al fuego o combustión. Existen materiales aislante térmicos que no son resistentes al fuego, destacándose las fibras celulósicas debido a su composición. Sin embargo, se puede adicionar productos químicos denominados ignífugos, para aportar resistencia al fuego (Kymäläinen and Sjöberg, 2008).

1.1. Metodología: “Resistencia al avance de la llama”

Según la normativa ASTM 4986-03 se comienza el experimento en una sala de climatización que se encuentra a una temperatura constante de 50 °C, en la cual se instalan todas las probetas a analizar durante un día para lograr que alcancen un estado de equilibrio, es decir, que no exista variaciones en la masa de las probetas ya que no habrá más pérdidas o ganancia de humedad que modifiquen su masa en

el momento de realizar un pesaje de las probetas. En esta sala de climatización, se da inicio al primer pesaje de las probetas con peso constante utilizando una balanza técnica y se registra cada valor de manera ordenada para cada probeta enumeradas del 1 al 15.

Se aplicará un triplicado de 4 diferentes concentraciones de un preservante de madera a cada probeta y, además, 3 probetas sin ninguna sustancia. Luego, se da inicio a la etapa de impregnación de las probetas con 3 litros de preservante de la madera contra incendios dentro de un recipiente. Por lo tanto, se sumerge la probeta en este líquido durante 2 minutos. Para destilar el líquido sobrante mediante escurrimiento, se debe colocar cada probeta en una rejilla con toalla absorbente durante 30 minutos en ambas caras. Es importante conocer la masa que tiene la probeta con la impregnación, antes de llevarlo al secado. Para conocer este valor, primero se debe pesar un platillo de aluminio y luego el platillo junto a una probeta impregnada. Al realizar una resta se obtendrá el peso de la probeta inicial o tiempo cero y, además, después se puede utilizar la misma ecuación para conocer el peso de la probeta después de secado en diferentes tiempos.

$$PI = PPI - P$$

(Ecuación 1)

- PI: masa de probeta impregnada (g)
- PPI: masa de platillo y probeta impregnada (g)
- P: masa de platillo (g)



(A)

(B)

(C)

(D)

Figura B1. Impregnación (A), Destilación (B), pesaje de platillo (C), pesaje de platillo y probeta impregnada antes de secado o después de secado (D).

Las probetas impregnadas junto al platillo deben ser colocadas en un equipo de secado a 81 °C durante 3 horas para posteriormente ser enfriadas y pesadas. Esto se realizará en diferentes tiempos 3, 1, 15 y 4 horas, hasta completar aproximadamente un día completo de secado para obtener un gráfico que muestre como la masa va disminuyendo. Cada vez que el platillo junto a la probeta impregnada es retirado del equipo de secado debe colocarse durante 30 minutos en un equipo de secado o enfriamiento para obtener el peso real o en equilibrio. Posteriormente, se realiza un pesaje registrando cada probeta y luego se vuelve ingresar a secado a 80 °C hasta que en un gráfico se pueda apreciar la disminución del peso de la probeta para volver a ingresar a secado pero esta vez a 105 °C, finalmente se ingresa a una sala de climatización.

Una vez obtenida las muestras secas y en equilibrio se procede a realizar la etapa final de la resistencia a la llama. Es importante realizar un pesaje antes de someter la probeta al fuego y una vez terminado el experimento. Primero, se debe instalar un soporte con una rejilla, en la cual se deberá colocar una probeta y debajo de esta se debe encontrar un mechero. Al momento de encender el mechero la distancia al fuego debe ser de 3 cm aproximadamente. Además, se debe instalar una reja para colocar las probetas y para medir el tiempo en que avanza la combustión en diferentes distancias. Es por esta razón, que se coloca al lado de cada muestra una madera que se encuentra previamente marcada en 12 cm, 6 cm y 2 cm. Se comienza a encender la llama del mechero durante 1 minuto y luego la probeta se instala en la reja para observar cómo avanza la llama. Es importante ir registrando el tiempo en que se devenga en llegar la llama en las distancias mencionadas anteriormente.

Los productos ignífugos proporcionan al panel aislante térmico una protección contra el fuego. Por lo tanto, en las probetas que presentan mayor concentración la llama avanza más lento y alcanza menores distancias o en algunos casos no alcanza a ninguna distancia (“5_ATSM 4986-03_Retardancia a la llama.pdf,” n.d.).

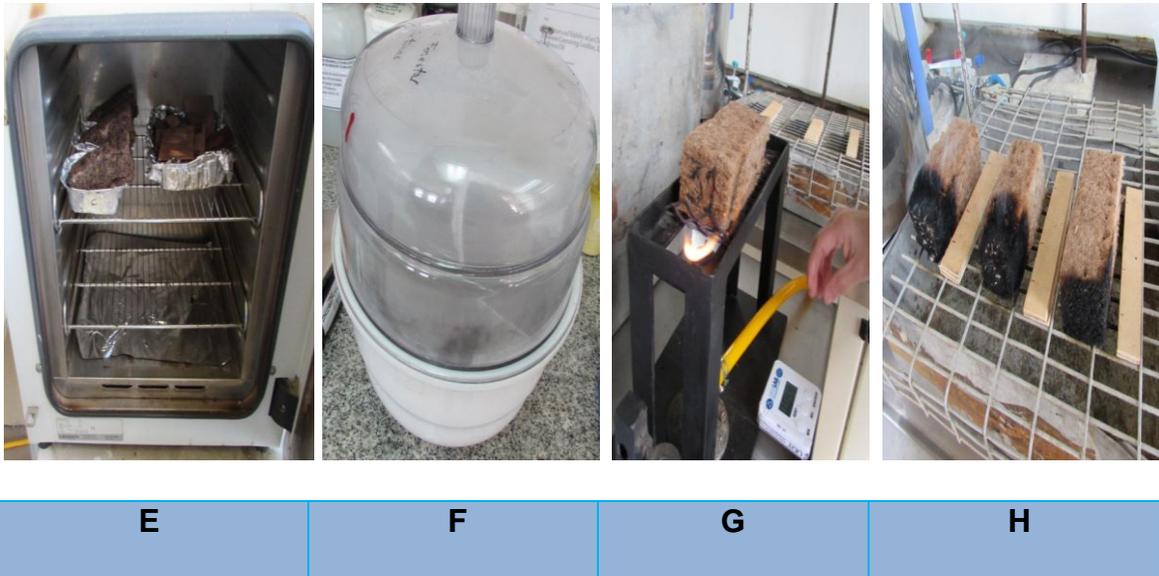


Figura B2. Secado (A), Desecado (B), Exposición al fuego (C), Avance de la llama en la probeta (D).

2. Espesor

Cuando se aumenta el espesor de un material aislante, tiene como consecuencia una disminución de la energía consumida durante el uso de un edificio. Además, requiere una mayor cantidad de material para la fabricación del material lo que significa un aumento considerable en el costo e impacto ambiental (Braulio-Gonzalo and Bovea, 2017; Olivieri *et al.*, 2017). Es por este motivo que se realizan esfuerzos en optimizar el espesor del material aislante para cumplir con los objetivos de reducir las demandas energéticas sin afectar al medio ambiente (Özel *et al.*, 2015; Ashouri *et al.*, 2016). Cabe destacar que la fabricación del material aislante debe diseñarse con el espesor mínimo (Uygunoğlu, Özgüven and Çalış, 2016) y que varía para cada región (Baniassadi *et al.*, 2016).

Un material aislante debe presentar un espesor determinado según los requisitos de las disposiciones reglamentarias, OGUC artículo 4.1.10 que detalla la resistencia y transmitancia térmica que debe presentar un material. Por lo tanto, el cálculo del espesor debe permitir que la resistencia térmica sea lo más alta posible, para obtener los ahorros de energía según la zona térmica del país.

El espesor mínimo de un panel aislante es como máximo de 20 mm para sistema de aislación térmica exterior (Muñoz, Ariztia and Campusano, 2007). El cálculo del espesor se realiza según norma NCh 853. Además, existe una lista oficial de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico para cada material aislante en Chile, los cuales fueron certificados por un laboratorio de control técnico de calidad de la construcción. (MINVU, 2014).

3. Difusividad térmica

Esta propiedad permite medir la velocidad a la que la temperatura cambia dentro de una sustancia o material. Su unidad en el Sistema Internacional se expresa como m^2/s (Rivero Nogueiras, 2016). Un buen aislante presenta una baja difusividad térmica.

$$a = \frac{\lambda}{C_e \cdot \rho}$$

(Ecuación 2)

Siendo:

- a: Difusividad térmica [m^2/s]
- λ : Coeficiente de conductividad térmica del material, en [$W/(m \cdot K)$].
- C_e : calor específico [$J/kg \cdot K$]
- ρ : Densidad [kg/m^3]

4. Calor específico (Ce)

Corresponde a la cantidad de energía necesaria para aumentar en $1^\circ C$ la temperatura de 1kg de material aislante, es decir, la capacidad de una sustancia para acumular energía en su unidad de masa (De *et al.*, 2010). Por lo tanto, el calor específico es un indicador que un material al que se ha suministrado calor, tendrá mayor o menor dificultad para experimentar cambios de temperatura. Un buen material aislante, presenta un elevado calor específico (Rivero Nogueiras, 2016).

$$C_e = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$

(Ecuación 3)

Siendo:

Ce: Calor específico [J/kg·K] ó [Kcal/Kg °C]

ΔQ : Cantidad de calor ganado o aplicado

m : Masa [kg]

ΔT : Diferencia de temperatura [K]; [°C]

5. Densidad

Esta propiedad indica la cantidad másica de panel aislante, por unidad de un volumen. Los materiales aislantes térmicos que tienen una alta densidad son mejores conductores de calor, es decir, su calidad como aislante disminuye (Muñoz, Ariztia and Campusano, 2007)

6. Conductividad térmica (λ)

Es una propiedad física de los materiales de medir la capacidad de conducir calor. Por lo tanto, esta característica de los materiales permite conocer la cantidad de energía que atraviesa, en la unidad de tiempo, una unidad de superficie y de espesor de un elemento constructivo, cuando se establece una diferencia de temperatura unitaria entre dichas caras. La λ de los materiales, se puede expresar en sistema internacional con $W/(m \cdot K)$ y también puede de definirse como $kcal/(h \cdot m \cdot ^\circ C)$ (Rivero Nogueiras, 2016 (MINVU, 2006).

$$\lambda = U * e \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Siendo:

- λ : Coeficiente de conductividad térmica del material, en [$W/(m K)$].
- U : Transmitancia térmica [$W/(m^2 K)$].
- e : Espesor del material, en [m].

Un valor bajo de conductividad en un material, significa mejor capacidad de aislamiento (MINVU, 2006). Este valor comienza a aumentar cuando los materiales se humedecen o cuando los materiales son porosos ya que los orificios con aire son reemplazados por agua. Cabe destacar que conductividad térmica del agua (0,026

W/mK) es mayor que la del agua 0,58 [W/mK] y al obtener un valor promedio entre la conductividad del material aislante y del agua se genera efectos negativos (Barrera, 2009). Es una característica propia de cada materia y no presenta un valor fijo de λ ya que dependen de ciertos factores como, por ejemplo, el deterioro o envejecimiento, antrópica y porosidad (Rodríguez, 2015); (Rivero Nogueiras, 2016).

6.1. Metodología Conductividad térmica

Se determina experimentalmente según Nch850.Of83 método de anillo de guarda para materiales homogéneos. La evaluación se realiza en estado seco según lo estipula la normativa, con el propósito de evitar el movimiento de contenido de agua desde la cara caliente hacia la cara fría. (Oficial, 2008). El método consiste en un aparato compuesto por una placa metálica caliente, la cual es provista con calefacción eléctrica y se encuentra rodeada por otra placa denominada anillo de guarda. La placa de anillo de guarda puede ser calentada. Se instala, junto a las caras de la placa caliente dos probetas de material aislante de iguales dimensiones, caras planas y paralelas. Por último, en las caras frías del material aislante se ajustan dos placas metálicas frías que se encuentran refrigeradas mediante corriente de agua u otro líquido. (Oficial, 2008)

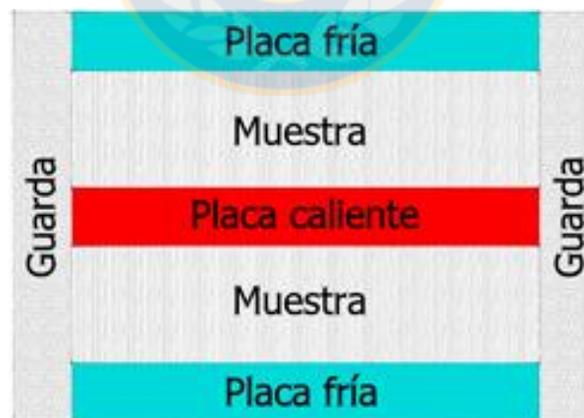


Figura B3. Esquema del aparato de placas térmicas con anillo de guarda.

Se debe destacar que se debe mantener a la misma temperatura la placa caliente y el anillo de guarda. La conductividad térmica se calcula según la siguiente fórmula.

$$\lambda = \frac{\phi * e}{2A(T_2 - T_1)}$$

(Ecuación 5)

Donde:

- λ = Conductividad térmica;
- ϕ = Potencia eléctrica, W, disipada en la placa caliente;
- e = Espesor, m, promedio de ambas placas;
- A = área, m², de la placa de calentamiento, corresponde al área promedio entre la superficie de la placa caliente y de la abertura central del anillo de guarda;
- $T_2 - T_1$ = Temperaturas de las caras calientes y frías, respectivamente (K).

7. Resistencia térmica, R100

El termino R100, significa resistencia térmica que presenta un material o elemento de construcción, multiplicado por 100 (NCh 2251). La resistencia térmica, corresponde a la capacidad de un material para oponerse al flujo del calor y es el inverso de la conductividad térmica. Por ende, mientras mayor sea la resistencia térmica mejor se comportará un material como aislante térmico. Su unidad se expresa de la siguiente manera: m²K/ W (MINVU, 2006).

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

(Ecuación 6)

Siendo:

- E : espesor de la capa (m)
- λ : conductividad térmica del material (W/m . k)

8 Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua (μ)

La propiedad de permeabilidad o difusividad es adimensional y hace referencia a permitir la difusión del vapor de agua a través de un material. Entonces, mide la cantidad de vapor de agua que se transmite a través del material de espesor dado por unidad de área, unidad de tiempo y de diferencia de presión parcial de vapor de agua. Cabe destacar que el valor de esta resistencia para el aire, que es el valor de referencia, es $\mu=1$ (Muñoz, Ariztia, & Campusano, 2007; Rivero Nogueiras, 2016).

$$\mu = \frac{\delta_{aire}}{\delta_{material}} \text{ (adimensional)} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Siendo:

- δ_{aire} : permeabilidad al vapor de agua del aire
- $\delta_{material}$: permeabilidad al vapor de agua del material

La conductividad térmica disminuye, al evitar la penetración de vapor de agua. En base a esto, un buen aislante debe presentar una alta resistencia a la difusión de vapor de agua para evitar que se formen condensaciones en un futuro, dificultando así la capacidad de aislar de un material (Rivero Nogueiras, 2016).

8.1 Metodología Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua (μ)

Según la normativa chilena existen dos métodos para determinar la permeabilidad al vapor de agua (humedad) de los materiales de construcción denominados: Método seco y método húmedo (Bío-bío, V, & G, n.d.). Se escogió el método seco y la instalación del ensayo fue en una sala de climatización o con condiciones atmosféricas controladas. Las condiciones ambientales para este ensayo fue la “opción A” que generalmente es la que se aplica y mediante instrumentos se logra mantener las siguientes condiciones: humedad relativa en el lado húmedo de 47% a 53 %, humedad relativa en lado seco de 0% a 3% y la temperatura que rondan los 23°C. Entre los materiales que se utiliza se encuentra un desecante denominado Sílica gel que permite mantener la humedad de aire deseado. El desecante escogido permite tener temperatura 23°C y humedad relativa entre 0% y 3%. Otro material necesario es un sellador resistente al paso del vapor de agua y se utiliza con la finalidad de que el borde del recipiente se pueda adherir a la probeta. También se utilizaran probetas, las cuales deben alcanzar un estado de equilibrio antes de comenzar el ensayo por lo que deben ser acondicionadas por un tiempo determinado. Estas probetas deben tener un área mayor o igual a 50 cm² y se realizara un triplicado o con otras palabras, tres probetas de un material aislante con el mismo procedimiento. Por último, para llevar a cabo este experimento se utilizó un recipiente de ensayo el cual debe cumplir con ciertos requisitos tales como: ser inerte e impermeable al agua o vapor. Otra característica que debe presentar es

que el diámetro sea superior o igual a 125mm. Un punto importante, es que el recipiente debe estar provisto de una orilla sobresaliente y el borde no supere 6 mm el espesor de la probeta.



I

J

K

Figura 4. Pesar Recipiente (I); Pesar Porbeta (J); Pesar: Recipiente + Silica gel (K)

El experimento se inicia ingresando la Silica gel en el recipiente y se debe tener en cuenta que se debe alcanzar los 6 mm respecto al borde superior. Luego se debe registrar la masa de la silica gel ingresado. El siguiente procedimiento es colocar la probeta dentro del recipiente y posteriormente colocar el sellante. Por último, realizar un registro sistemático del peso del sistema completo, hora en que se realizó la medición y condiciones de cámara: temperatura y humedad. Estos registros se realizaran cada 24 horas durante 3 semanas hasta que por lo menos en tres mediciones la masa se mantenga constante en el tiempo.

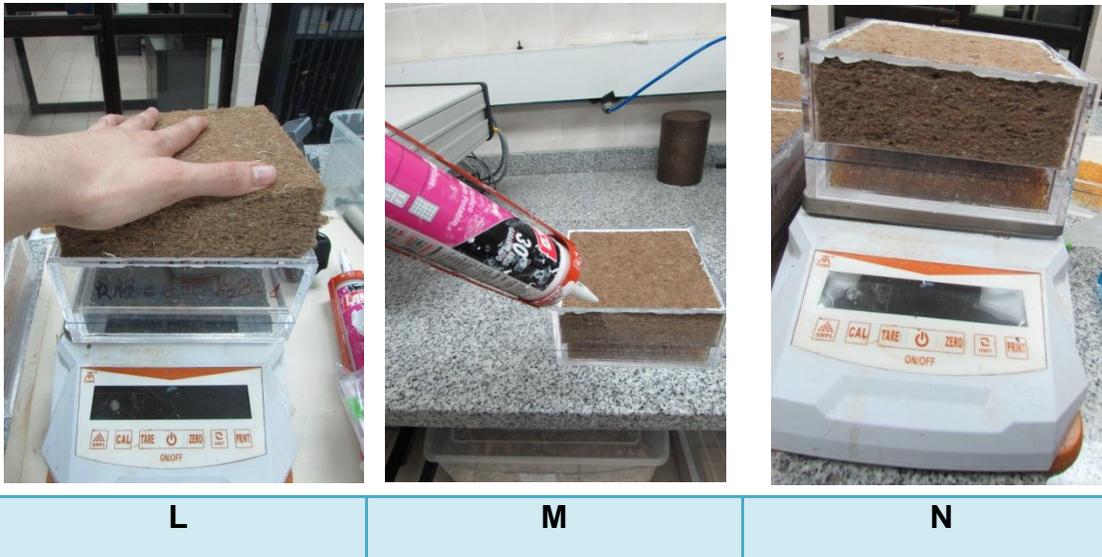


Figura 5. Adición de la Silica gel y probeta al recipiente **(L)**; Sellar con el pegamento en las orillas **(M)**; Pesar sistema completo **(N)**.

9. Resistencia a mohos

Las desventajas de utilizar materiales biológicos estudiados es que la humedad afecta la conductividad térmica y la resistencia térmica. Es importante tener en cuenta que este experimento se basa en la metodología denominada Resistencia a hongos de pudrición en suelo (ASTM D1413-07). El objetivo consiste en utilizar un preservante para su aplicación en un panel aislante con fibras de corteza de Eucalyptus s.p para comprobar en diferentes concentraciones la resistencia a la pudrición ya que puede generar efectos negativos en su propiedad de aislación. El ***Trametes versicolor***, es el hongo que se empleara para comprobar la eficiencia del persevante con diferentes concentraciones.

Se inicia la preparación de 20 paneles aislantes con fibras de corteza de Eucalyptus s.p. A partir del dimensionado de los paneles se debe aplicar diferentes concentraciones de un persevante para verificar la resistencia al hongo en los laboratorios del centro de biotecnología en la Universidad de Concepción. Posteriormente, se ingresan cada una de las muestras a una sala de climatización durante 2 semanas para lograr un equilibrio en la humedad relativa y temperatura.

Una vez logrado este equilibrio, se procede a registrar el peso de los ensayos para registrar este dato como peso inicial.

Se debe realizar una esterilización del hongo “***Trametes versicolor***” mediante la aplicación radiación gamma. Se prosigue a efectuar un montaje de frascos en una cámara de flujo laminar durante aproximadamente 1 hora con la finalidad de obtener una condición estéril de las muestras junto al hongo. El siguiente paso consiste en ingresar los frascos a una sala de incubación durante 3 meses y finalmente lograr limpiar el hongo superficialmente, el cual se lleva a la sala de climatización para posteriormente registrar el peso como “peso final”. Finalmente se realiza un cálculo que corresponde a la pérdida de peso según la siguiente ecuación 7.

$$\%Perdida\ de\ peso = \frac{P_{inicial} - P_{Final}}{P_{Final}} \times 100 \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Siendo:

- $P_{inicial}$: Peso inicial.
- P_{Final} : Peso final.



Anexo C. Inventarios del ciclo de vida del proceso de fabricación del panel aislante.

Tabla C 1. Inventario del cultivo de rotación corta para producción del panel referido a la unidad funcional (R: 1 m²K/ W)

Cultivo de rotación corta					
Entradas desde la tecnosfera	Unidades	25 kg/m³	50 kg/m³	75 kg/m³	100 kg/m³
Corteza de pino	kg/R	3,79	7,74	12,12	16,50
Expanded Polystyrene	g/R	2,21,E-05	4,5,E-05	7,07,E-05	9,62,E-05
<u><i>Agrochemicals</i></u>					
Urea	g/R	0,14	0,29	0,45	0,61
Fungicide, Thiram	g/R	5,26,E-05	1,1,E-04	1,68,E-04	2,29,E-04
Herbicides, Glyphosate	g/R	14,31	29,25	45,78	62,32
Insecticides, cyperkill	g/R	1,0	2,04	3,20	4,35
Ternary Fertilizer,	kg/R	0,02	0,047	0,07	0,10
Diammonium Phosphate	kg/R	0,21	0,43	0,67	0,92
<u><i>Combustibles</i></u>					
Diesel	kg/R	0,129	0,26	0,41	0,56
petróleo	g/R	1,240	2,54	3,97	5,40
lubricante	g/R	4,782	9,78	15,30	20,83
Entradas desde la naturaleza					
Agua	kg/R	4	7,720	12,08	16,45
Salida desde la tecnosfera					
E. Globulus biomasa	kg/R	80,65	164,89	258,09	351,30
Salida desde naturaleza					
<u><i>Emisiones aire</i></u>					
SO ₂	g/R	1,16	2,37	3,70	5,04
NO _x	g/R	6,38	13,04	20,41	27,78
CO ₂	Kg/R	0,38	0,78	1,21	1,65
CO	g/R	1,46	2,99	4,68	6,37
VOC	g/R	0,86	1,76	2,75	3,75
N ₂ O	g/R	3,83	7,82	12,24	16,66
Pentane	g/R	0,04	0,08	0,12	0,17
NMVOG	mg/R	3,83	7,82	12,24	16,66

CH ₄	mg/R	15,46	31,61	49,48	67,34
MP	g/R	0,14	0,29	0,45	0,62
N ₂	g/R	11,17	22,84	35,75	48,66
NH ₃	g/R	9,42	19,25	30,13	41,01
NO ₂	g/R	5,E-03	0,01	0,015	0,02
<i>Emisiones agua</i>					
PO ₄ ⁻	g/R	1,91	3,91	6,12	8,33
NO ₃	kg/R	0,24	0,49	0,77	1,05

Tabla C2. Inventario de la planta de astillado para producción del panel referido a la unidad funcional (R: 1 m² K/ W)

Planta de astillado					
Entradas desde la tecnosfera	Unidades	25 kg/m³	50 kg/m³	75 kg/m³	100 kg/m³
<i>Materiales</i>					
Madera trozas	kg /R	80,65	164,89	258,09	351,30
<i>Combustibles/electricidad</i>					
Diésel	kg /R	0,0017	3,38,E-03	5,28,E-03	7,19,E-03
Bencina	kg /R	0,00014	2,80,E-04	4,38,E-04	5,97,E-04
Electricidad	kWh /R	1,05	2,14	3,35	4,56
Salidas hacia la tecnosfera					
Astillas	kg /R	25,90	52,95	82,89	112,82
Finos	kg /R	0,50	1,02	1,60	2,17
Corteza	kg /R	1,58	3,24	5,07	6,90
Salidas hacia la naturaleza					
Factor de actividad transporte	km/R	0,0004	0,0009	0,0013	1,82,E-03
<i>Emisiones aire</i>					
MP ₁₀	g /R	1,25,E-03	2,56,E-03	4,01,E-03	5,46,E-03
NO _x	g /R	3,65,E-03	7,46,E-03	1,17,E-02	1,59,E-02
CO	g /R	1,04,E-03	2,13,E-03	3,33,E-03	4,53,E-03
HC	g /R	3,64,E-04	7,45,E-04	1,17,E-03	1,59,E-03
MP _{2,5}	g /R	4,95,E-04	1,01,E-03	1,58,E-03	2,15,E-03

Tabla C3. Inventario de la planta de fabricación del panel aislante referido a la unidad funcional (R: 1 m²K/ W)

Fabricación paneles aislantes de corteza de Eucaliptus					
Entradas desde la naturaleza	Unidades	25 kg/ m³	50 kg/ m³	75 kg/ m³	100 kg/ m³
Agua caldera	kg/R	2,16	4,42	2,16	9,408
Entradas desde la tecnosfera					
<i> Materiales </i>					
Corteza	kg/R	1,58	3,24	5,07	6,90
Fibras biocomponentes	kg/R	0,048	0,10	0,15	0,21
Material ignifugo	kg/R	0,0059	0,012	0,02	0,03
Material anti fúngico	kg/R	0,0059	0,012	0,02	0,03
<i> Energéticos </i>					
Electricidad	MWh/R	5,85,E-03	1,20,E-02	0,019	2,55,E-02
Consumo calor proceso	kg/R	6,09	1,24,E+01	1,95,E+01	2,65,E+01
Gas natural	m3/R	0,16	3,19,E-01	4,99,E-01	6,79,E-01
Salidas hacia la tecnosfera					
Resistencia Térmica, R (UF)	m2K/W	1	1	1	1
Flujo Referencia	kg panel	1,13	2,3	3,6	6,9
Salidas hacia la naturaleza					
<i> Emisiones Aire </i>					
NO _x < 90% carga	kg/R	8,32,E-03	1,70,E-02	2,66,E-02	3,62,E-02
CO < 90% carga	kg/R	1,01,E-03	2,07,E-03	3,24,E-03	4,41,E-03
CO ₂	kg/R	2,89,E-01	5,90,E-01	9,23,E-01	1,26,E+00
SO ₂	kg/R	1,54,E-06	3,15,E-06	4,94,E-06	6,72,E-06
TOC	kg/R	4,30,E-03	8,79,E-03	1,38,E-02	1,87,E-02
CH ₄	kg/R	3,80,E-03	7,78,E-03	1,22,E-02	1,66,E-02
VOC	kg/R	3,15,E-04	6,44,E-04	1,01,E-03	1,37,E-03
PM ₁₀ (filtrable)	kg/R	1,01,E-04	2,06,E-04	3,22,E-04	4,39,E-04

PM2.5 (filtrable)	kg/R	1,01,E-04	2,06,E-04	3,22,E-04	4,39,E-04
PM (condensable)	kg/R	2,60,E-05	5,31,E-05	8,32,E-05	1,13,E-04
<u>Emisiones Suelo</u>					
Impurezas trituración	kg/R	0,018	0,037	0,058	0,078
<u>Emisiones Agua</u>					
Agua evaporada secado y vapor condensado.	kg/R	2,097	4,29	6,71	9,13



Tabla C4. Estimación de los kilómetros recorrido según el origen y tipo de transporte.

	Origen	Tipos transporte	km
Trozas madera	Plantaciones-Astillado	Camión (16-32 ton)	130
Corteza	Astillado -Panel	Camión (16-32 ton)	40
Fibras sintéticas bi-componente	Estados Unidos	Barco	8500
Aditivo ignifugo	Santiago Chile	Camión (16-32 ton)	530
Aditivo antifúngico	Santiago Chile	Camión (16-32 ton)	530
Diésel (Silvicultura+astilla)	Concepción	Camión (16-32 ton)	34
Pesticidas (Glyfosato)	Chillas, Los Ángeles	Camión (16-32 ton)	130
Fertilizantes*	Chillas, Los Ángeles	Camión (16-32 ton)	130
Lubricantes	Chillas, Los Ángeles	Camión (16-32 ton)	34
Diésel	Concepción	Camión (16-32 ton)	34

Anexo D: Obtención del flujo de referencia

Tabla D1. Flujo de referencia (kg) necesario para garantizar la unidad funcional (1 m²K/W).

Propiedades	Unidad	Valor			
Densidad	Kg/m ³	25	50	75	100
Conductividad térmica, λ	W/m.K	0.045	0.046	0.048	0.049
Resistencia térmica, R100	m ² .K/W	111	178	223	223
Área	m ²	1	1	1	1
Flujo de referencia	Kg	1,13	2,3	3,6	4,9

Fuente: Valores obtenido en laboratorio perteneciente a UDT. Según NCh 2251: R110: valor equivalente a la resistencia térmica (m²K/W) X 100.