



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE AISLANTE DE CORTEZA DE EUCALIPTO EN VIVIENDAS SOCIALES COMPARADO CON EL USO DE AISLANTES CONVENCIONALES



Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

CRISTIÁN VARGAS BELLO

Profesora Guía: Yannay Casas Ledón

Concepción, Chile

2021



“EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE AISLANTE DE CORTEZA DE EUCALIPTO EN VIVIENDAS SOCIALES COMPARANDO CON EL USO DE AISLANTES CONVENCIONALES.”

PROFESOR GUÍA: Dra. YANNAY CASAS LEDÓN

PROFESOR COMISIÓN: Dra. PATRICIA GONZÁLEZ SÁNCHEZ

PROFESOR COMISIÓN: Dr. RICARDO FIGUERO 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, junio 2021



AGRADECIMIENTOS

Esta tesis de pregrado fue parte de un proceso arduo y complejo en mi vida, por ende, es necesario recalcar mis agradecimientos a quienes hicieron posible este logro, principalmente a quienes me apoyaron durante todo el tiempo que me fue requerido para sobrellevar mis duelos.

A mi familia, le dedico este logro, sin duda ustedes son y serán un soporte fundamental por toda mi vida, los adoro con el alma. Madre, sin duda, las dificultades nos han llevado a mejor puerto, la cercanía que hemos logrado espero que no la dilate el tiempo, Carlos, gracias por la paciencia, por el cariño que le brindas a mi madre; Roberto, gracias por la preocupación y la compañía, Eduardo, sin duda, no me alcanzarían las palabras para señalar lo mucho que te amo y te aprecio, eres y serás por siempre mi mejor amigo, siempre agradeceré tus buenas vibras, tu alegría y tu apoyo incondicional.

A mi padre y a mi abuela, o como los solía llamar, pá, marce, los llevaré por siempre en el corazón, espero estén orgullosos de mi dónde sea que estén.

A mi novia, Ayleen, has logrado sacar lo mejor de mí y has sido mi mayor sostén en estos tiempos difíciles, sin duda, te has ganado mi corazón y te estaré agradecido por siempre.

A mis amigos, gracias por estar a mi lado cada vez que lo he necesitado, por los buenos y malos momentos, a todos los considero parte de mi familia. Sin lugar a dudas, no importa los destinos que nos depare la vida, espero poder reencontrarme con ustedes todas la veces que sea posible.

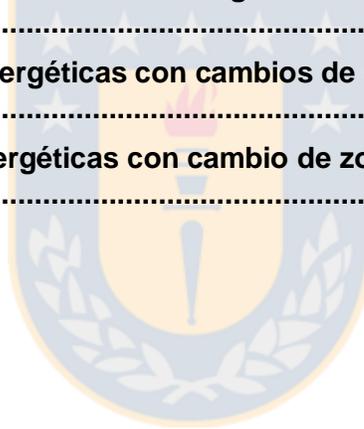
A la profesora Yannay, muchísimas gracias por todo, pese a las circunstancias, su paciencia y consideración fue una ayuda indispensable en todo este proceso, valorando todo el esmero que puso para así lograr mi mayor esfuerzo.

Además, agregar mis agradecimientos a todos los profesores de la facultad de ciencias ambientales que formaron mi carrera universitaria y fueron parte fundamental no solo de mi formación profesional, sino que, a su vez de mi madurez personal, a todos ustedes, muchísimas gracias.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| ÍNDICE DE TABLAS | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vi |
| RESUMEN | vii |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 8 |
| 1.1. Pregunta de Investigación | 10 |
| 1.2. Objetivos | 10 |
| 1.2.1. Objetivo general..... | 10 |
| 1.2.2. Objetivos específicos..... | 10 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 11 |
| 2.1. Eficiencia Energética..... | 11 |
| 2.1 Energía en el Sector Residencial..... | 12 |
| 2.2 Balance energético en la vivienda social en Chile | 15 |
| 2.3 Tipos de Aislantes Térmicos | 21 |
| 2.4 Fibras Eucaliptus como aislante térmico..... | 24 |
| 2.5. Ventajas del uso de aislantes térmicos de corteza de eucalipto en comparación a tradicionales | 27 |
| 2.6. Herramientas de Simulación Energética..... | 29 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 31 |
| 3.1 Caso estudio | 32 |
| 3.2 Objetivo 1: Selección de tipologías y aislantes..... | 34 |
| 3.2.1 Selección de tipología de vivienda..... | 34 |
| 3.2.2 Selección aislantes convencionales | 36 |
| 3.3 Objetivo 2: Modelado y selección de parámetros y variables de la vivienda..... | 39 |
| 3.3.1 Modelo y variables constructivas..... | 40 |
| 3.3.2 Variables adicionales | 44 |
| 3.4 Objetivo 3: Balance energético de vivienda simulada | 45 |
| 3.4.1 Determinar demanda energética de la vivienda | 45 |
| 3.4.2 Comparación de gasto energético e interpretación..... | 46 |
| 3.4.3 Análisis de sensibilidad de balance energético | 47 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 48 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.1 | Demanda de energía en las tipologías de viviendas | 48 |
| 4.1.1. | Tipología Albañilería Poliestireno exp. y Poliuretano exp. | 48 |
| 4.1.2 | Tipología Madera Layer Lana Mineral (1) | 53 |
| 4.1.3 | Tipología Madera Layer Poliestireno (2) | 55 |
| 4.1. | Análisis de resultados comparativos entre tipologías..... | 58 |
| 5. | CONCLUSIONES | 65 |
| 6. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 68 |
| 7. | ANEXOS | 72 |
| | ANEXO I: Soluciones constructivas seleccionadas para la determinación de las configuraciones de muros | 72 |
| | ANEXO II: Transmitancias y resistencias térmicas de tipologías y configuraciones seleccionadas | 76 |
| | Anexo III: Proyección de la demanda energética en nuevas normativas constructivas | 80 |
| | ANEXO IV: Demandas energéticas con cambios de orientación por tipología y configuración de muro | 81 |
| | ANEXO V: Demandas energéticas con cambio de zona térmica por tipología y configuración de muro | 85 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Conductividad Térmica de paneles aislantes con diferentes materias primas. | 23 |
| Tabla 2: Requerimientos de energía por fabricación y Potencial de calentamiento global de variados materiales aislantes. | 28 |
| Tabla 3: Parámetros normativos para envolvente térmico establecidos en reglamentación térmica. | 33 |
| Tabla 4. Valores de Transmitancia térmica máxima de la envolvente térmica (U), y de R100 mínimo del material aislante térmico para elementos de techo, muro y piso ventilado | 34 |
| Tabla 5: Configuraciones de muros escogidos por tipología con su respectivo aislante convencional. | 36 |
| Tabla 6: Especificaciones físicas de las capas que configuran los muros por tipología y aislante convencional. | 37 |
| Tabla 7: Especificación técnica de paneles aislantes flexibles de corteza de eucalipto. | 39 |
| Tabla 8: Transmitancia y resistencia térmica de muros con tipología albañilería. | 41 |
| Tabla 9: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de albañilería | 48 |
| Tabla 10: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de madera con configuración de muro de lana mineral. | 53 |
| Tabla 11: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de madera con configuración de muro de poliestireno expandido. | 56 |
| Tabla 12: Transmitancia y resistencia térmica de muros Tipología Madera con Lana Mineral. | 76 |
| Tabla 13: Transmitancia y resistencia térmica de muros Tipología Madera con Poliestireno. | 77 |
| Tabla 14: Requerimientos máximos a futuro de demanda en calefacción para vivienda por zona. | 80 |
| Tabla 15: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de albañilería con orientación Este. | 81 |
| Tabla 16: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de albañilería con orientación Norte. | 81 |
| Tabla 17: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de albañilería con orientación Oeste. | 82 |
| Tabla 18: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de madera con configuración de muro de lana mineral y orientación Este. | 82 |
| Tabla 19: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de madera con configuración de muro de lana mineral y orientación Norte. | 82 |
| Tabla 20: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de madera con configuración de muro de lana mineral y orientación Oeste. | 83 |
| Tabla 21: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de madera con configuración de muro de poliestireno expandido y orientación Este. | 83 |
| Tabla 22: Demanda energética anual y por m ² de vivienda de madera con configuración de muro de poliestireno expandido y orientación Norte. | 84 |

Tabla 23: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de poliestireno expandido y orientación Oeste. 84

Tabla 24: Demanda energética anual y por m² de vivienda de albañilería en zona térmica 3 (Santiago). 85

Tabla 25: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de lana mineral en zona térmica 3 (Santiago). 85

Tabla 26: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de poliestireno expandido en zona térmica 3 (Santiago). 86



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Fuentes de energía para calefacción en Chile | 13 |
| Figura 2: Emisiones según fue la fuente a nivel nacional en Chile | 14 |
| Figura 3: Principales gastos energéticos de vivienda en la zona central de Chile | 14 |
| Figura 4: Principales gastos energéticos de vivienda en la zona sur de Chile..... | 15 |
| Figura 5: Mapa de zonificación térmica..... | 18 |
| Figura 6: Esquema ganancias y pérdidas térmicas de una vivienda | 20 |
| Figura 7: Mapa Forestal Región del Biobío. | 25 |
| Figura 8: Resumen de metodología empleada por objetivos del estudio..... | 31 |
| Figure 9: Plano base de vivienda social en estudio..... | 32 |
| Figura 10: Esquema de selección de tipología de vivienda | 35 |
| Figura 11: Tipología Albañilería - Demanda Energética (kWh/mes) | 50 |
| Figura 12: Porcentaje de disminución de la demanda energética al sustituir poliestireno expandido por aislantes de corteza de eucalipto..... | 51 |
| Figura 13: Porcentaje de disminución de la demanda energética al sustituir poliuretano expandido por aislantes de corteza de eucalipto..... | 52 |
| Figura 14: Tipología Madera Lana Mineral - Demanda Energética (kWh/mes) | 54 |
| Figure 15: Porcentaje de disminución de la demanda energética al sustituir lana mineral por aislantes de corteza de eucalipto. | 55 |
| Figura 16: Tipología Madera Poliestireno - Demanda Energética (kWh/mes) | 57 |
| Figura 17: Porcentaje de disminución de la demanda energética al sustituir poliestireno expandido por aislantes de corteza de eucalipto..... | 58 |
| Figura 18: Demanda Energética (kWh/año) por tipología, configuración de muro y aislante. | 59 |
| Figure 19: Demanda Energética (kWh/año) por orientación en configuraciones de muro con aislante de corteza de eucalipto 100kg/m3..... | 62 |
| Figura 20: Demanda Energética (kWh/año) por zona térmica en configuraciones de muro con aislante de corteza de eucalipto 100kg/m3 | 63 |
| Figura 21: Solución constructiva tipología albañilería poliestireno exp..... | 72 |
| Figura 22: Solución constructiva tipología albañilería poliuretano exp | 73 |
| Figura 23: Solución constructiva tipología madera poliestireno exp | 74 |
| Figura 24: Solución constructiva tipología albañilería poliestireno exp..... | 75 |

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es evaluar energéticamente el uso de aislantes térmicos a partir de corteza de eucalipto para ser usado en muros de viviendas sociales de la ciudad de Concepción. En este estudio, se utilizó el *software* de simulación energética *DesignBuilder* con el cual se modeló una vivienda unifamiliar a la cual se le otorgaron distintos envolventes térmicos que varían tanto en materialidad como aislación. Para este estudio, se consideraron dos tipologías de viviendas una de madera y la otra de albañilería. Además, se realizó una comparación de los gastos energéticos entre diferentes aislantes térmicos, considerando los aislantes de corteza de eucalipto y los tradicionales.

Los resultados señalan que existe una disminución de la demanda energética promedio anual para el aislante de corteza de eucalipto, aproximadamente 20% en comparación con aislantes convencionales. Sin embargo, en la vivienda de madera con aislación de poliestireno expandido se encontró la mayor disminución del gasto energético de un 33% en comparación con el aislante de corteza de eucalipto de mayor espesor (100mm). Para el caso de la configuración de vivienda de madera con aislación de lana mineral presentó valores energéticos similares al utilizar el aislante de corteza de eucalipto de menor espesor (50mm), encontrándose una disminución de cerca de 3%.

Esto en síntesis demuestra que el aislante de corteza de eucalipto presenta mayores beneficios energéticos en comparación con aquellas que utilizan aislantes convencionales. Para proyecciones de vida útil de una vivienda de 30 años significan reducciones de cerca de 150 kWh/m² en el escenario menos beneficioso y, de 522 kWh/m² en el que se genera mayor aprovechamiento energético. Por tanto, es posible confirmar que su utilización en construcciones residenciales en la zona generaría grandes reducciones en la demanda energética de la región y el país, como a su vez, que el uso de este aislante como solución constructiva consigue las especificaciones de demanda energética por metro cuadrado que se espera para un futuro.

1. INTRODUCCIÓN

Chile, a la vez que la mayoría de los países, ha demostrado un aumento considerable de la demanda energética, donde al día de hoy no es capaz de solventar debido a la insuficiencia de fuentes de abastecimiento. Por esta razón, se han implementado fomentos al ahorro energético en el sector residencial, buscando el desarrollo de una mayor eficiencia energética en las edificaciones, esto al disminuir las pérdidas de energía a través de su envolvente. Para estos se ha establecido un enfoque en el análisis de propiedades térmicas de los materiales utilizados en las envolventes de los edificios para evaluar su respuesta térmica. (D. A. Vasco et al.,2016).

Durante la última década el consumo de energía eléctrica en el sector residencial ha sido responsable del 16% de la demanda de energía eléctrica (CA Agostini et al., 2012). El consumo medio de energía, el cual incluye todas las fuentes de energía, (calefacción, refrigeración, agua caliente, etc.) en una casa en Chile es de 10.232 kWh/año. Este valor se considera alto y se explica por la participación del uso de la madera como fuente de energía (46,6%), principalmente en el sur del país debido a su bajo costo y mayor disponibilidad en comparación con otras fuentes.

En el sur de Chile, la madera es utilizada principalmente para mantener las condiciones de confort térmico al interior de la vivienda. Una de las principales soluciones para mejorar el rendimiento energético de una edificación es gestionar el flujo de calor a través de su envolvente térmica. La mayor parte de la energía utilizada en el sector residencial se destina principalmente a la calefacción y refrigeración de espacios y, por lo tanto, para reducir el consumo de energía, se requieren sistemas constructivos y de aislación eficientes. (F. Aldawi et al.,2013)

Lograr el bienestar térmico de los ocupantes de una vivienda es un objetivo fundamental al diseñar un espacio habitable, con la capacidad de mantener una

demanda energética compatible con las actividades que se desarrollan al interior del mismo. En Chile, la vivienda social no es capaz de cumplir con este objetivo, debido a que las viviendas no son diseñadas teniendo esto en mente, donde un gran porcentaje de las viviendas mantiene una superficie reducida con una alta tasa de ocupación y los materiales que componen su envolvente (muros, piso, techo y ventanas) presentan baja aislación térmica.

En consecuencia, las viviendas sociales, quienes representan un gran porcentaje del total de viviendas construidas en el país, presentan un desempeño energético deficiente, los espacios interiores permanecen extensos períodos en condiciones de bajo confort térmico cuando no existen sistemas de climatización y, en caso de existir, el uso de energía es ineficiente debido al incorrecto diseño de la vivienda. Es por esto que se requiere darle una mayor eficiencia energética a la envolvente térmica de la vivienda social en Chile para proporcionar una mejor calidad de vida a los usuarios y un uso eficiente de los recursos energéticos. (Vera S., Órdenes M., 2002).

Es debido a lo anterior que se establece una mirada a quienes son responsables de determinar una mejoría de la eficiencia de la envolvente térmica de una vivienda, los aislantes que la componen, donde se puede reconocer un amplio trabajo en este aspecto en la última década, dando un mayor énfasis en aquellos fabricados con fibras naturales debido a sus menores impactos ambientales en sus etapas de fabricación. De los cuales, se puede distinguir una gran factibilidad del panel aislante de corteza de eucalipto, debido a su amplia cantidad de materia prima presente en el país y sus propiedades térmicas competitivas en relación con los aislantes más utilizados globalmente (Casas-Ledón Y; Daza K. et al., 2020)

Esta investigación se emplea con la finalidad de evaluar si existe una disminución en las demandas energéticas de una vivienda que utilice un aislante de corteza

de eucalipto en comparación con aislantes convencionales en su etapa de uso y las repercusiones energéticas que esto generaría.

1.1. Pregunta de Investigación

¿Cuáles son los gastos energéticos asociados al uso de panel aislante térmico de corteza de *Eucalyptus sp* en viviendas sociales en la región del Biobío? ¿Son menores que los alcanzados por aislantes de muro convencionales?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general del presente estudio es evaluar energéticamente las implicaciones en muros de los aislantes térmicos de corteza de eucalipto en viviendas sociales de la región del Biobío.

1.2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos se plantea:

1. Proponer tipologías de vivienda social configuradas con aislantes convencionales de uso recurrente en la región del Biobío.
2. Realizar un balance energético del uso de aislantes térmico de muro en una vivienda social de especificaciones normativas, para cada aislante y tipología propuesta.
3. Comparar los gastos energéticos resultantes del uso del aislante natural de corteza de eucalipto versus los distintos aislantes para cada tipología y configuración de la vivienda en evaluación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Eficiencia Energética

En la actualidad, gran parte de los sectores energéticos de los países se enfrentan a múltiples y complejos desafíos, como el crecimiento de la demanda de energía, la dependencia energética, el cambio climático, la expansión del sistema eléctrico y el aumento del consumo energético. Es por esto que la eficiencia energética (EE) como lo establece la Dirección de Análisis y Estrategia de Energía (DAEE), el año 2016, ha surgido como un proceso viable y solución sostenible para estos desafíos, ya que la eficiencia energética y su uso racional son esenciales para la planificación de un país, del cual se puede obtener como resultado minimizar el consumo de energía, aumentar los niveles de competitividad y reducir la huella de carbono. (Silvero et al., 2019).

Existen variadas formas de definir "eficiencia energética", donde matemáticamente se define como "La relación de salida versus entrada de rendimiento, servicio, bienes o energía" y de manera más general se la puede encontrar como "el uso de una tecnología o un comportamiento para desempeñar una determinada tarea o función al mismo nivel de calidad utilizando menor energía". La diferencia entre la implementación óptima y actual del costo-efectividad energética es denominada brecha de eficiencia energética. Por lo tanto, "mejoramiento de la eficiencia energética" es posible definirlo como incremento de la eficiencia energética resultado de la tecnología, la economía y/o cambios del comportamiento". (Kamal et al., 2019).

Es, por tanto, que la búsqueda de nuevas tecnologías ayudaría a disminuir las demandas energéticas estimadas en alza, particularmente en el sector residencial, del cual se ha demostrado una gran factibilidad para generar cambios en el envolvente con este propósito final.

2.1 Energía en el Sector Residencial

De forma global, según la Agencia Internacional de Energía, calefaccionar una vivienda implica entre 40 y 60% del consumo energético medio, siendo el sector residencial el responsable de altas demandas de energía y del 40% de las emisiones de CO₂ que recibe el planeta, KM M , además de otros gases de efecto invernadero. De acuerdo al Balance Nacional de Energía, establecido por la Comisión Nacional de Energía, el sector residencial consume 23% de la energía total en Chile. Donde es posible disminuir estas altas considerando una serie de medidas asociadas a una reducción de demanda de energía, así como aumentar la eficiencia energética. (Martínez P.W., Kelly M.T., 2015).

En 2005, Chile tuvo la mayor tasa de crecimiento del consumo de energía en Sudamérica, con un crecimiento medio anual del 7%, duplicando así su consumo en la última década del siglo XX; pero no así la producción de energía del país. Lo que generó como resultado un aumento en la necesidad del volumen de las importaciones de energía y una dependencia de esta. El sector comercial, público y residencial en conjunto representó el 30% del consumo final de energía, un valor que tuvo un crecimiento del 6% en la última década del siglo XX. Según la Comisión Nacional de Energía de Chile, el potencial de ahorro de energía tiene un carácter importante para el país y es una forma viable para el ahorro de energía de entre el 20% y el 25% sólo para el sector residencial según estimaciones desde 1993. Tomando como referencia el año 2000, el consumo final de energía en Chile creció de 19.928 ktoe (thousand tonnes of oil equivalent) a 28.320 ktoe en 2016 (un 42%). Donde el sector residencial mostró una disminución significativa de su participación en el consumo final de energía (del 24% en 2000 al 15% en 2016), lo que se puede traducir en una reducción de 4790 ktoe a 4248 ktoe durante este período (una disminución del 11%). Esta disminución es posible atribuirla a variados programas enfocados en eficiencia energética en este sector. (Silvero et al., 2019).

Según establece el Ministerio de Medio Ambiente el año 2014 en su informe “Futuro de la calefacción en Chile: Opciones y Consecuencias” (MMA, 2014), alrededor del 47% de la energía con la que se calefaccionan los chilenos viene de la leña como se muestra en la Figura 1. Esto ha implicado a su vez ser responsable del 90% de las emisiones de PM2.5 a nivel nacional según se muestra en la Figura 2. Donde a su vez categorizan que 58% de la energía utilizada en una casa en la zona central del país es por concepto de calefacción y que alcanza un 81% en una casa en la zona sur (Figura 3 y 4). Por lo cual establecer las emisiones respectivas de una vivienda y su impacto medioambiental como a su vez la comparativa de estas al hacer uso de nuevas tecnologías forma parte de un estudio científico que sustentaría las bases para la disminución de la demanda energética para calefacción y la búsqueda de una mayor eficiencia energética.

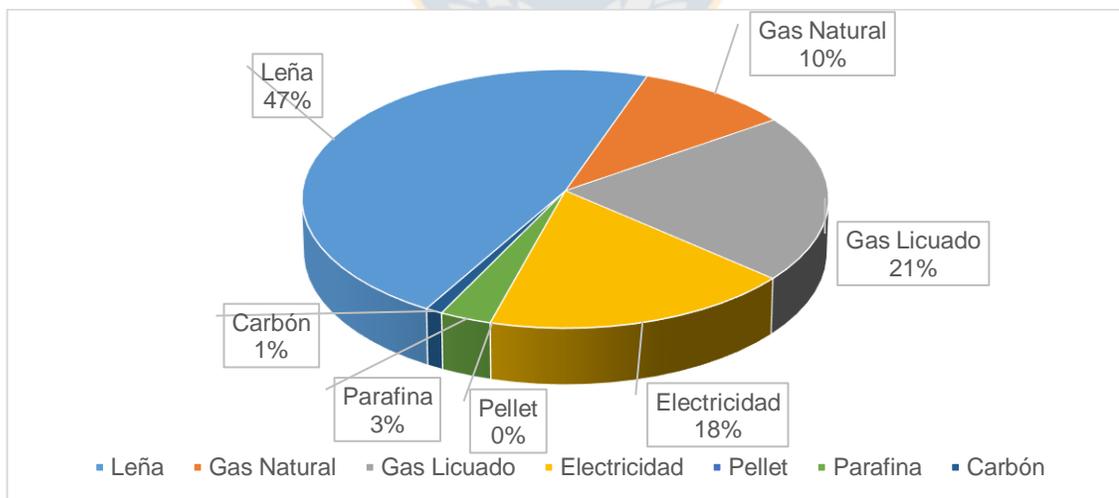


Figura 1: Fuentes de energía para calefacción en Chile.

Fuente: Futuro de la calefacción en Chile: Opciones y Consecuencias.(MMA, 2014).

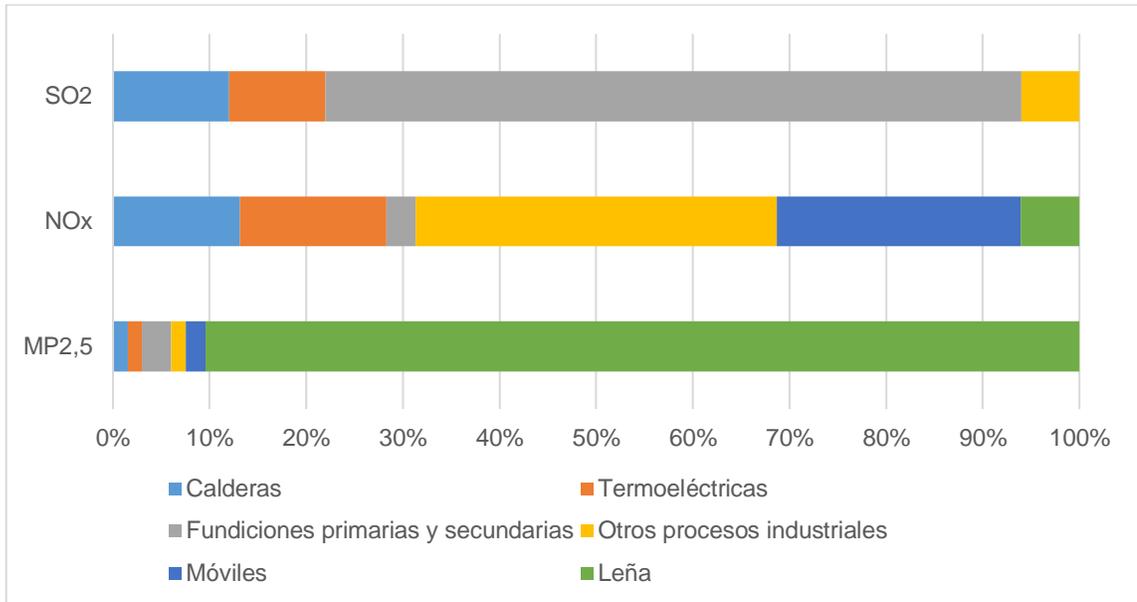


Figura 2: Emisiones según fue la fuente a nivel nacional en Chile.
 Fuente: Futuro de la calefacción en Chile: Opciones y Consecuencias. (MMA, 2014).

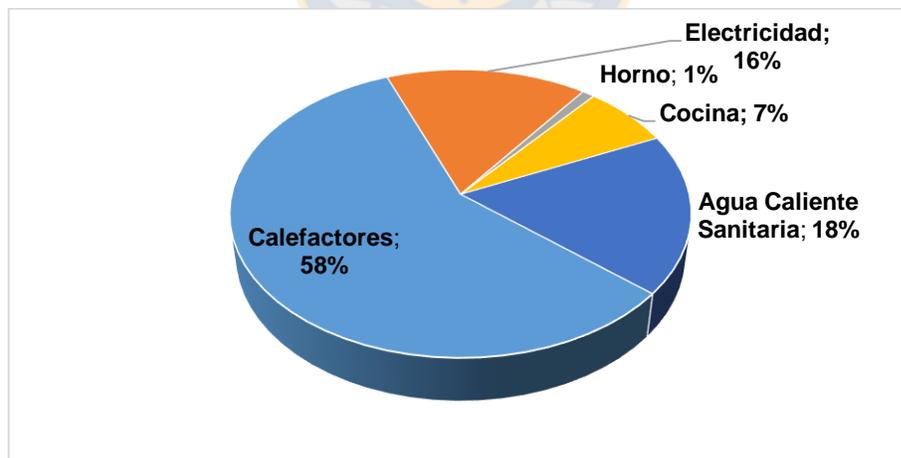


Figura 3: Principales gastos energéticos de vivienda en la zona central de Chile.
 Fuente: Futuro de la calefacción en Chile: Opciones y Consecuencias. (MMA, 2014).

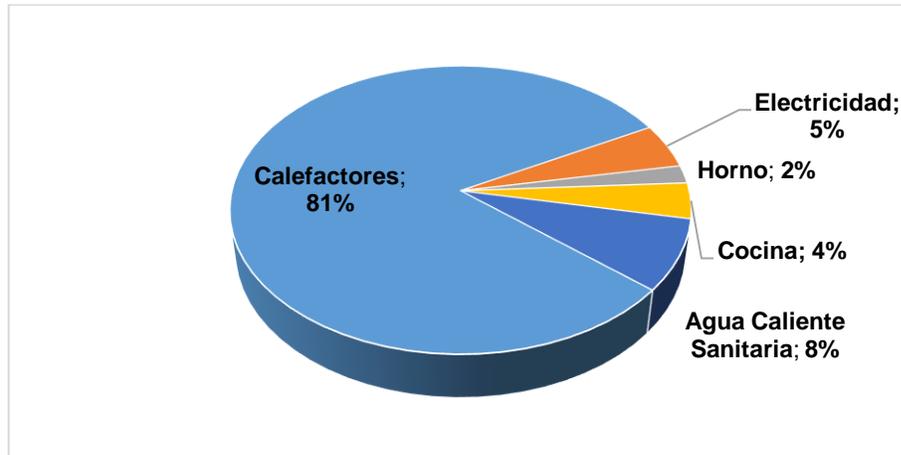


Figura 4: Principales gastos energéticos de vivienda en la zona sur de Chile.

Fuente: Futuro de la calefacción en Chile: Opciones y Consecuencias. (MMA, 2014).

2.2 Balance energético en la vivienda social en Chile

Se ha establecido que el desempeño energético de las viviendas es una preocupación creciente debido a su relevante participación en el consumo general (un 22% en Chile el año 2011), que proviene mayormente de fuentes combustibles foráneas y no-renovables, lo que, por tanto, mantiene un alto impacto ecológico. Además, esta influencia gracias a su incidencia en la calidad ambiental y el confort interior de las viviendas, con una ascensión de los precios que debilita mantener las condiciones adecuadas, especialmente en sectores sociales más vulnerables. Lo que ha motivado múltiples estudios y acciones para mejorar la eficiencia energética de las viviendas, la mayor parte dedicadas a la materialidad de su envolvente y el rendimiento de los equipos domésticos, tanto eléctricos como de calefacción. No obstante, una variedad de autores sugiere que la forma general de los edificios posee adicionalmente una alta relevancia en su comportamiento ambiental (Álvarado R.G., González A., 2014)

Para desarrollar un análisis del desempeño energético de la vivienda se establece una comparación de los parámetros de aislación térmica de muros de

fachada, de techumbres, ventanas y pisos ventilados, los cuales se encuentran normados por la Reglamentación Térmica y parámetros no contemplados bajo normativa de aislación térmica, pisos no ventilados (placas sobre terreno), aislación térmica de puente, aislación ponderada vertical y cambios de aire por infiltración, donde se utilizan como valores límites los consignados por estudios para la certificación de desempeños para la zona (Damico F.C. et al., 2012).

En 1994, Chile fue el primer país de América Latina en incorporar en su código de construcción requisitos con respecto al acondicionamiento térmico de las viviendas. Donde el Ministerio de Vivienda y Urbanismo creó reglamentos térmicos voluntarios para las viviendas en Chile, el cual se dividió en tres etapas.

Desde el año 2000, se establecieron requerimientos específicos a la techumbre de las viviendas; a partir del 2007, se integraron requisitos para paredes, ventanas y pisos y, por último, la calificación energética de las viviendas. Sin embargo, estas medidas aún mantienen carácter voluntario; pero se proyecta darle un carácter obligatorio en un futuro próximo. Es importante destacar una medida planificada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, la cual consiste en subsidios ofrecidos para el acondicionamiento térmico de viviendas, con el objetivo de facilitar el cumplimiento de la normativa establecida.

Esta acción representa una estrategia eficaz para garantizar la aplicación de las regulaciones y lograr los resultados esperados, que sigue siendo un desafío en otros países de la región (Silvero et al., 2019).

En el año 2000, entró en vigencia la primera reglamentación térmica que involucraba sólo especificaciones respecto a la aislación de techumbres. La reglamentación térmica actual, comenzó a aplicarse a partir del año 2007 y está referida a todos los elementos de la envolvente térmica. En el Art. 4.1.10 de la O.G.U.C. (Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, 2006) se establecen las exigencias mínimas de acondicionamiento térmico para los complejos de techumbre, muros perimetrales y pisos ventilados. El valor mínimo

para la resistencia térmica total (RT) y la transmitancia térmica (U) de estos complejos depende de la zona térmica que se esté evaluando.

Para la aplicación de esta normativa se dividió el país en 7 zonas térmicas que se aplican al Chile continental e insular, excluyendo la antártica (Figura 5). Estas zonas se definen en base al criterio de los grados día de calefacción anuales, en base a información meteorológica de larga data. Los grados día de calefacción se refieren a la demanda de energía de una vivienda para lograr la temperatura de confort interior base. (Escorcía O. et al., 2012)





Figura 5: Mapa de zonificación térmica.

Fuente: Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social. (Bustamante, 2009).

El bienestar térmico es fundamental para proveer un ambiente confortable, la zona de confort térmico es definida según diversos estudios en los cuales el 80% de la población presenta una sensación psicológica de agrado con el ambiente. La frontera que define la zona de confort depende de la temperatura y humedad relativa del ambiente, velocidad del aire, vestimenta de las personas y temperatura de las superficies de los espacios. La ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers) define la zona de confort con un límite inferior de 21,8°C de temperatura ambiente y 73% de humedad relativa y un límite superior de 26,3°C de temperatura ambiente y 22% de humedad relativa, para velocidades del aire menores a 0,22 m/s (Vera S., Órdenes M., 2002).

Como plantea Hunn en 1996, debido a que una vivienda es un sistema dinámico el cual tiene comportamientos variables en el tiempo, el análisis de su comportamiento térmico no se cierra sólo a la evaluación de las propiedades térmicas de los materiales constituyentes, sino que a entender su funcionamiento como un sistema integral (Vera S., Órdenes M., 2002).

El comportamiento térmico de una vivienda mantiene dependencia de diversos factores, los cuales interactúan en tiempo y gobiernan los mecanismos de transferencia de calor desde y hacia el interior de la edificación, cuyo resultado es la temperatura del ambiente interior. En una vivienda se producen ganancias y pérdidas de calor con respecto a la temperatura de confort (generalmente $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$). Realizando un balance térmico se puede determinar las cargas de calefacción y refrigeración requeridas para mantener la temperatura de confort en el ambiente. (Vera S., Órdenes M., 2002).

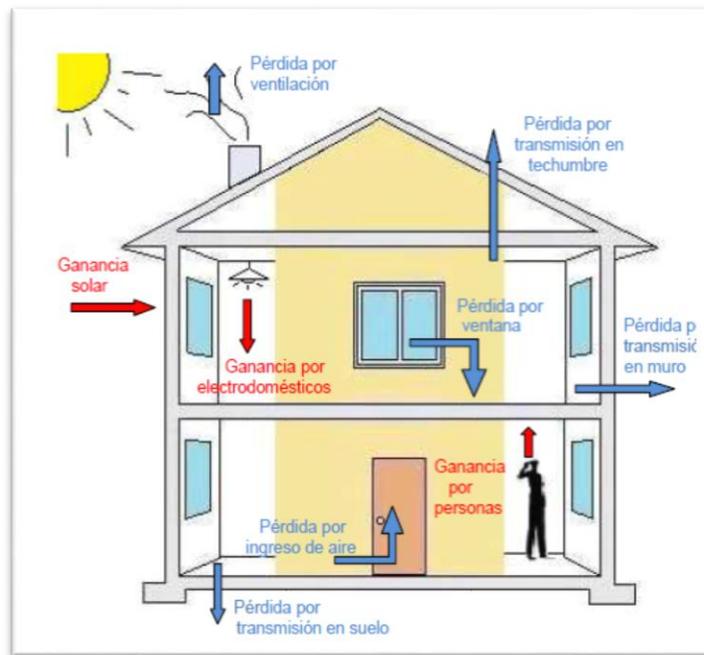


Figura 6: Esquema ganancias y pérdidas térmicas de una vivienda.

Fuente: Consumo de energía a nivel residencial en Chile y análisis de eficiencia energética en calefacción. (Romero Ramos N., 2011).

Existen variadas estrategias para el control térmico de las viviendas, las cuales se enfocan en incrementar o reducir las ganancias y/o pérdidas de calor, dependiendo de la situación particular de cada vivienda según sea la estación del año, esencialmente escenario de invierno y verano, siendo las principales:

- Calefacción solar pasiva (aprovechamiento de la radiación solar para calefaccionar las viviendas a través del uso de materiales masivos en muros y radier, superficies vidriadas orientadas adecuadamente y aislación térmica exterior).
- Aislación térmica de la envolvente.
- Protección solar.
- Uso de materiales y elementos constructivos con propiedades térmicas adecuadas.

Cabe mencionar que las viviendas en que el balance energético demuestra una menor eficiencia energética se atribuye a las viviendas del tipo social, las cuales no fueron construidas con objetivos de calidad energético-ambiental, sino que para satisfacer la necesidad de vivienda para personas que carecían de ella. Donde como menciona HONG et al., 2009 en Chile, son miles las familias que viven bajo la línea de la “pobreza energética” (en inglés fuel poverty), causada por una combinación de bajos ingresos y altos costos de energía, además de una ineficiencia energética y mala calidad de la envolvente térmica de la vivienda. Por tanto, es importante realizar un análisis del balance energético en este tipo de viviendas debido a la amplia disponibilidad con la que se encuentra en el país y a los reducidos estándares de regulación térmica que estas mantienen.

2.3 Tipos de Aislantes Térmicos

El consumo de energía de una vivienda depende fuertemente de las características de su envolvente. El rendimiento térmico de las paredes externas representa un factor clave para aumentar la eficiencia energética del sector de la construcción y reducir las emisiones de gases de la casa verde (Schiavoni et al, 2016).

El aislamiento es uno de los métodos más efectivos destinados a reducir el consumo energético tanto en calefacción y enfriamiento de edificios. Seleccionar los materiales adecuados y determinar el espesor de aislamiento en la construcción es fundamental para determinar una eficiencia térmica óptima. Dentro de la gran variedad de aislantes es posible clasificarlos en base a la materia prima con la cual son fabricados, siendo así de origen sintético, orgánico e inorgánico.

Aislantes sintéticos: Son fabricados a partir de derivados del petróleo y mediante procesos químicos industriales. Suelen ser encontrados en forma de placa de espuma rígida, lo que los vuelve de fácil instalación. Esto en conjunto

con su bajo costo los ha puesto a la cabeza de los aislantes de mayor ocupación en el sector de la construcción residencial e industrial. Dentro de estos se encuentran los poliestirenos y poliuretanos expandidos y extruidos.

Aislantes inorgánicos: Están fabricados en base a materia prima que como dice su nombre son inorgánicos, donde los más conocidos son los fabricados en base a fibras de vidrio o mineral. Son muy resistentes a la temperatura a diferencia de los aislantes de origen sintético.

Aislantes orgánicos: Son fabricados en base a materia prima de origen vegetal o animal, principalmente renovables. Sus propiedades físicas han demostrado lograr buenos resultados de aislación y existen algunos ya presentes en el mercado. (corcho, algodón, etc.)

Actualmente se presenta esta gran variedad de aislantes térmicos utilizados en el sector residencial y donde en el caso particular de Chile existe una utilización marcada de aislantes del tipo sintético (Poliestireno expandido, poliuretano expandido, etc.) tal como señala el documento Listado de soluciones constructivas de la OGUC, el cual es de carácter normativo para la construcción de viviendas sociales en el país. A su vez existe un gran interés por encontrar nuevas maneras de aislación térmica en viviendas que mantenga una mirada ecológica, con la clara intención de reducir los impactos ambientales que se producen al momento de fabricarlos. Tal como señala Schiavoni et al., 2016, en donde menciona nuevas estrategias de producción de aislantes que mantienen menores impactos ambientales asociado a un menor costo de producción. De aquí es posible resaltar los estudios realizados por Fuentealba C, 2017 y Casas-Ledón Y; Daza K. et al., 2020, en los cuales se demuestra la disminución de los impactos ambientales asociados a la etapa de fabricación de un nuevo aislante de corteza de eucalipto s.p, el cual tiene gran capacidad de comercio en Chile, debido a la gran cantidad de materia prima existente.

Uno de los fundamentos para determinar la factibilidad de un aislante son sus

propiedades térmicas, donde el valor de la conductividad térmica es sumamente importante y el cual mientras presente menores valores es mejor la propiedad de aislación del material. (Asdrubali et al., 2017)

La Tabla 1 señala las distintas conductividades térmicas de los aislantes térmicos de distinto origen, donde es apreciable que los valores menores son los presentados por los aislantes de origen sintético, seguido por los aislantes inorgánicos y finalmente los de origen orgánico, sin embargo, es necesario precisar que el total de los aislantes observados presenta buenas conductividades térmicas.

Tabla 1: Conductividad Térmica de paneles aislantes con diferentes materias primas.

| Tipos aislantes | Clasificación | Conductividad térmica (W/m.K) | Densidad (kg/m ³) | Referencias |
|------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|--|
| Poliestireno Expandido | Sintético | 0,029 - 0,053 | 10 - 25 | Rodríguez, 2015; Ricciardi, et al., 2014 |
| Poliuretano Expandido | Sintético | 0,019 - 0,040 | 30 - 60 | Rodríguez, 2015; Ricciardi, et al., 2014 |
| Lana de vidrio | Inorgánico | 0,030 - 0,050 | 25 - 80 | Rodríguez, 2015; Ricciardi, et al., 2014 |
| Lana mineral | Inorgánico | 0,030 - 0,050 | 25 - 80 | Rodríguez, 2015; Ricciardi, et al., 2014 |
| Corcho | Orgánico | 0,034 - 0,100 | 95 - 130 | Rodríguez, 2015; Ricciardi, et al., 2014 |

| | | | | |
|--------------------------|----------|---------------|----------|--|
| Cáñamo | Orgánico | 0,037 - 0,070 | 70 - 130 | Rodríguez, 2015; Ricciardi, et al., 2014 |
| Lino | Orgánico | 0,037 - 0,047 | 25 | Rodríguez, 2015; Ricciardi, et al., 2014 |
| Celulosa | Orgánico | 0,034 - 0,069 | 30 - 60 | Rodríguez, 2015; Ricciardi, et al., 2014 |
| Algodón | Orgánico | 0,040 - 0,069 | 20 - 60 | Rodríguez, 2015; Ricciardi, et al., 2014 |
| Lana de oveja | Orgánico | 0,035 - 0,050 | 25 - 80 | Rodríguez, 2015; Ricciardi, et al., 2014 |
| Fibra de kenaf | Orgánico | 0.038 | 50 | Ricciardi, et al., 2014 |
| Corteza de Eucalyptus sp | Orgánico | 0,045 – 0,049 | 25 - 100 | Fuentealba C. et al., 2017 |

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, es importante utilizar materiales aislantes con el fin de limitar el impacto medioambiental en el uso de estas soluciones. Un creciente interés se centra en la incorporación de materiales reciclados de bajo costo en los productos de construcción y su uso potencial como paneles aislantes para nuevos edificios y remodelaciones. (Ricciardi P. et al., 2014)

2.4 Fibras Eucaliptus como aislante térmico

El *Eucalyptus s.p.* es un género de árbol de gran importancia en el país, siendo primordial en la industria forestal y, por tanto, tiene una particular influencia en la Región del Biobío. A nivel regional desempeña un papel relevante como materia prima fundamental en esta industria para la producción de pulpa de madera. En

los últimos 43 años, la población forestal con fines industriales ha incrementado desde 350.000 hectáreas en el año 1970 a los 3.084.354 de hectáreas en el año 2017. La región del Biobío es la principal zona forestal con un 48% de la superficie total plantada (Figura 7). Como plantea INFOR en su documento “El sector forestal chileno 2019” en la región se registran 630.569, hectáreas de plantaciones forestales, de las cuales 55,5 % corresponde a *Pinus Radiata* y 41,9 % a *Eucalyptus sp.*

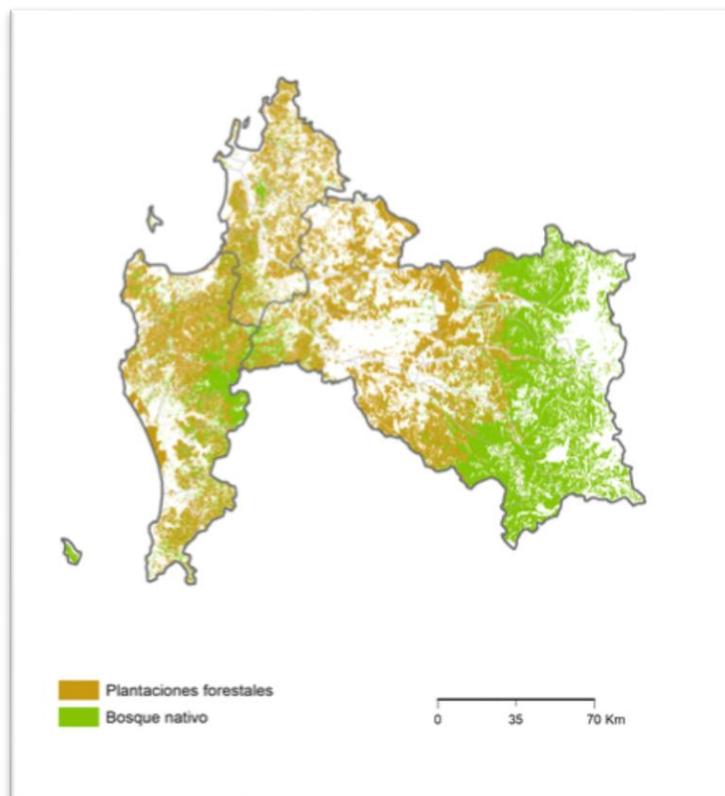


Figura 7: Mapa Forestal Región del Biobío.
Fuente: Infor, 2017.

En Chile la Industria forestal genera como productos trozas de madera, madera aserrada, astillas, pulpa, paneles, postes, polines. Donde cabe por motivos del estudio resaltar los subproductos que se generan en la parte de esta industria

encargada del aserrío, principalmente la corteza, que alcanza volúmenes aproximado de generación de 1.329.154 m³, 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 la mayor parte de su aplicación para fines energéticos. Sin embargo, como menciona Araújo et al., 2016; Hansted et al., 2016, esta presenta limitaciones en su uso directo por sus altos contenidos de humedad, naturaleza higroscópica, variedad dimensional y de volumen, baja masa y su alto contenido de resinas. (Sette Jr.et al.,2018).

Tal como lo establecen los estudios realizados por Fuentealba C, 2017 y Casas-Ledón Y.; Daza K. et al., 2020, el panel aislante con corteza de Eucalyptus s.p estudiado ha demostrado la factibilidad de su utilización en los muros que conforman el envolvente térmico de una vivienda localizada en cualquier zona térmica establecida en la reglamentación térmica, debido a que su resistencia térmica multiplicada por 100 (R100) se encuentra en un rango de 111- 223 m² K/W sobrepasando los valores mínimos establecidos en la norma, en donde la región del Biobío pertenece a la zona 4 de la reglamentación térmica de la OGUC, en la que sus exigencias mínimas para los materiales aislantes en los muros es de 46 m² K/W.

Como lo demuestran los resultados obtenidos en la tesis de habilitación profesional realizada por Daza el año 2019, el panel proveniente de corteza de eucalipto presenta buenos comportamientos térmicos, esto se ve evidenciado en su conductividad (0,045- 0,049 W/m K), siendo ligeramente mayores que los tradicionales (33%). En cambio, comparados con fibras naturales presenta comparable conductividad térmica (15%). Además, el panel aislante propuesto presenta buena resistencia a la llama (no genera llama), paso del vapor (u: 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 el fuego genera problemas de seguridad y humos tóxicos. Siendo la principal razón del 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 presentó malos rendimientos térmicos y ambientales causados por: fuego, hongos y termitas.

2.5. Ventajas del uso de aislantes térmicos de corteza de eucalipto en comparación a tradicionales

Los aislantes térmicos de uso en construcción han aumentado su investigación en cuanto a los impactos ambientales atribuibles a su fabricación debido a la amplia gama de productos sintéticos que se utilizan de forma global y que a grandes rasgos son quienes lideran el mercado de la aislación térmica. Es por esto que distintos autores establecen la importancia de las nuevas materias primas de fibra natural para la fabricación de estos ya que presentan menores impactos ambientales, reduciendo la emisión de carbono equivalente. (Teshnizi et al., 2018).

Desde el punto de vista ambiental los materiales de origen natural son quienes muestran un menor impacto ambiental, esto se asocia a requerimientos menores de consumos de energía para su fabricación y menores gases efecto invernadero (GEI) como se muestra en la Tabla 2 (Rodríguez, 2015; Ricciardi, 2014; Casas-Ledón Y.; Daza K. et al., 2020) En cambio los aislantes de origen sintético (poliestireno expandido y poliuretano) son quienes requieren una alta energía incorporada por unidad de masa de fabricación. (Ricciardi, Belloni and Cotana, 2014)

Tabla 2: Requerimientos de energía por fabricación y Potencial de calentamiento global de variados materiales aislantes.

| Aislantes | Energía Consumida (MJ/fu) | Potencial Calentamiento global (KgCO₂/fu) | Referencias |
|--|----------------------------------|---|-----------------------------|
| Poliestireno Expandido | 130 | 5,0 | Ricciardi, et al., 2014 |
| Poliuretano Expandido | 125 | 5,1 | Ricciardi, et al., 2014 |
| Lana de vidrio | 229 | 9,8 | Ricciardi, et al., 2014 |
| Lana mineral | 50 | 2,5 | Ricciardi, et al., 2014 |
| Corcho | 258 | 5,7 | Ricciardi, et al., 2014 |
| Fibra de kenaf | 42,3 | 1,1 | Schiavoni et al., 2016 |
| Corteza de Eucalyptus sp 25 kg/m ³ | 16,24 | 1,4 | Y. Casas-Ledón et al., 2020 |
| Corteza de Eucalyptus sp 50 kg/m ³ | 33,6 | 2,8 | Y. Casas-Ledón et al., 2020 |
| Corteza de Eucalyptus sp 75 kg/m ³ | 52,6 | 4,3 | Y. Casas-Ledón et al., 2020 |
| Corteza de Eucalyptus sp 100 kg/m ³ | 72,3 | 5,9 | Y. Casas-Ledón et al., 2020 |

Fuente: Elaboración propia.

Al hacer una comparación de los aislantes de fibras naturales como a su vez del aislante de corteza de eucalipto en estudio con aquellos de origen sintético e inorgánico en términos de emisión de carbono en el proceso de fabricación de estos, se demuestra que quienes presentaron menores emisiones fueron aquellos fabricados en base a fibra de kenaf y corteza de eucalipto (Tabla 2). Las emisiones de carbono generadas por los paneles aislantes de corteza de

Eucalyptus s.p (1,4-5,9 kg CO_{2eq}/fu) son equiparables con aquellas generadas por materiales de origen natural (1,1- 5,7 kg CO_{2eq}/fu)) (fibra de kenaf, corcho). En este caso, el incremento de la densidad en conjunto con el aumento de espesor en el panel aislante de eucalipto lo hace menos competitivo en términos de emisiones GEI. Donde es reconocible que los paneles con densidades superiores a 75 kg/m³ muestran emisiones superiores a los paneles de origen natural (Casas-Ledón Y.; Daza K. et al., 2020)

2.6. Herramientas de Simulación Energética

En general, los sistemas de análisis o simulación energética son programas informáticos en los cuales se deben indicar distintas características de una edificación para así calcular las transferencias térmicas internas del inmueble.

En estos softwares se deben ingresar antecedentes climatológicos del lugar, forma de la vivienda, materiales que lo componen, equipos instalados y patrones de ocupación. De donde al hacer uso de esta información el programa efectúa procesamientos matemáticos para determinar las condiciones interiores de la vivienda, lo cual se puede dar en resultados temporales puntuales o a largo plazo.

Como menciona Garcia-Alvarado et al., 2014 en su estudio de los distintos softwares de simulación energética, la gran variedad de estos tiene relación con las funciones que estos poseen y a su vez de los resultados esperados, donde existen 4 programas que presentan los resultados más acertados y que requieren un mayor conocimiento para su utilización, esto debido a que presentan mayor cantidad de herramientas e información que puede ingresarse en el proceso de modelación de la vivienda. Estos programas son los softwares DesignBuilder, ESP-R Openstudio y TAS.

La principal importancia de la utilización de estos softwares en el sector residencial es la proyección anticipada de las demandas energéticas de una vivienda, de manera que es capaz el usuario de determinar los componentes de la vivienda que generan los mayores impactos en términos de gasto energético, a fin de encontrar soluciones que provoquen mejores índices de eficiencia energética.

El software Design Builder utiliza el motor de simulación EnergyPlus y mantiene una alta capacidad de ingreso de información al modelo lo que conlleva a una mayor precisión de los resultados, a su vez su interface y sistema de modelado es bastante intuitivo lo cual permite que personas con poco conocimiento en estos programas encuentre facilidad en su uso (González A., 2012).

Algunas ventajas de la utilización de este software mencionados por Saavedra S (2017):

- ✓ Comparar múltiples alternativas de diseño fácilmente.
- ✓ Optimizar el diseño en cualquier etapa, considerando múltiples objetivos, restricciones y variables de diseño.
- ✓ Modelar rápidamente incluso edificios con geometrías muy complejas.
- ✓ Importar modelos BIM y planimetría CAD.
- ✓ Visualización de diseños por zonas.
- ✓ Cálculo de calefacción y refrigeración.
- ✓ Simulación detallada, diseño de HVAC y sistemas de ventilación natural.
- ✓ Análisis económico basado en los costos de construcción, costos de servicios públicos y los costos del ciclo de vida.
- ✓ Modelos con estándar de energía ASHRAE 90.1 y LEED.

3. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo la siguiente metodología con la finalidad de determinar los consumos energéticos asociados al uso de un aislante de muro no convencional creado a partir de corteza de eucalipto en una vivienda social y, a su vez, comparar la demanda de energía con aquellos aislantes de uso convencional en Chile. El procedimiento se llevó a cabo bajo un orden de actividades las cuales son señaladas en la siguiente Figura 8:

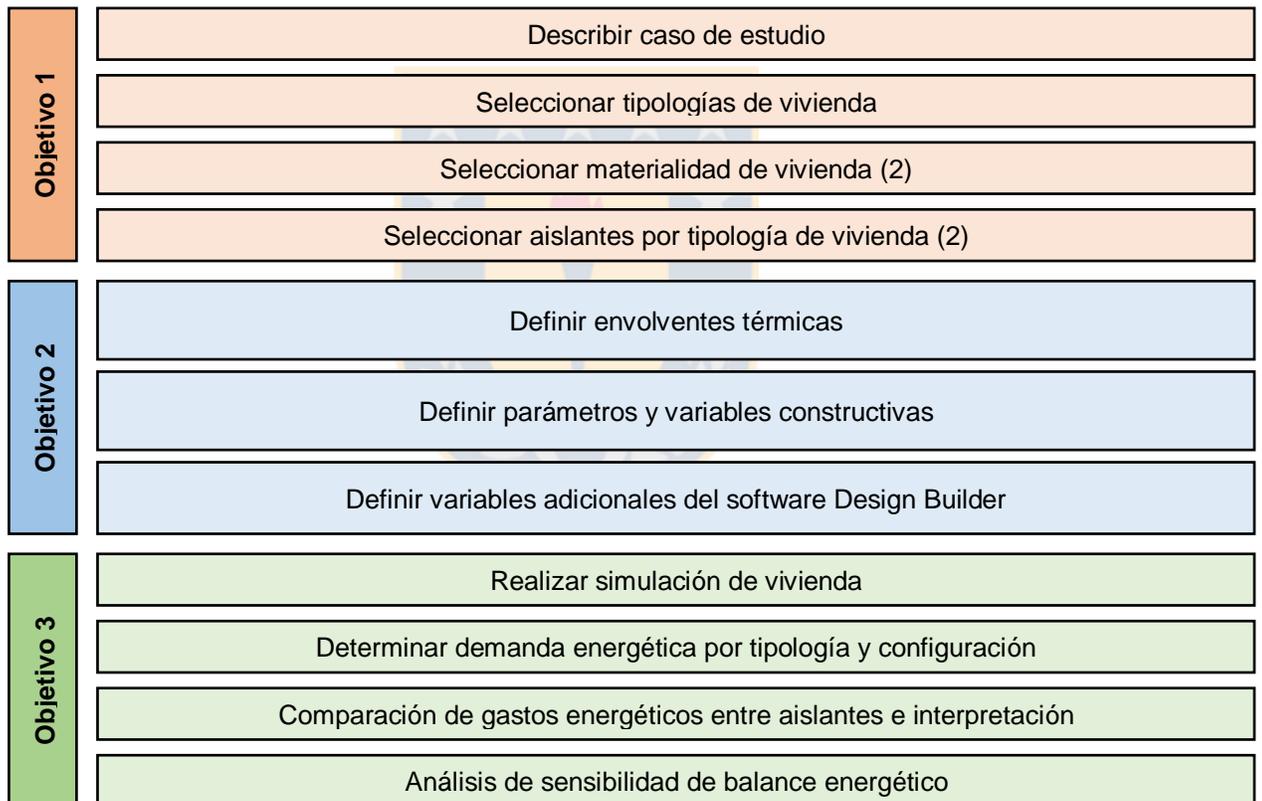


Figura 8: Resumen de metodología empleada por objetivos del estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Caso estudio

El caso estudio es una vivienda social en la ciudad de Concepción de dimensiones de superficie y forma utilizadas en el estudio de Vasco D.A. et al 2017, ya que se desarrolla en conformidad con la intencionalidad de la presente tesis de realizar un balance de energía de una vivienda social. Por consiguiente, se replicó la vivienda de base aislada de 44 metros cuadrados dispuesta en un solo piso con la misma distribución de sus habitaciones como lo muestra la Figura 9. Agregado a esto se estableció una orientación Sur para la vivienda debido su mayor incidencia en la demanda energética como lo menciona Vera S; Ordenes M, 2002, en donde particularmente en invierno se produce un incremento de la demanda energética de la vivienda por concepto de calefacción, debido a que las pérdidas por conducción de la envolvente térmica aumentan en mayor cantidad que las ganancias por radiación solar, Estableciendo así el mejor escenario para demostrar la variación de demanda energética por este concepto.

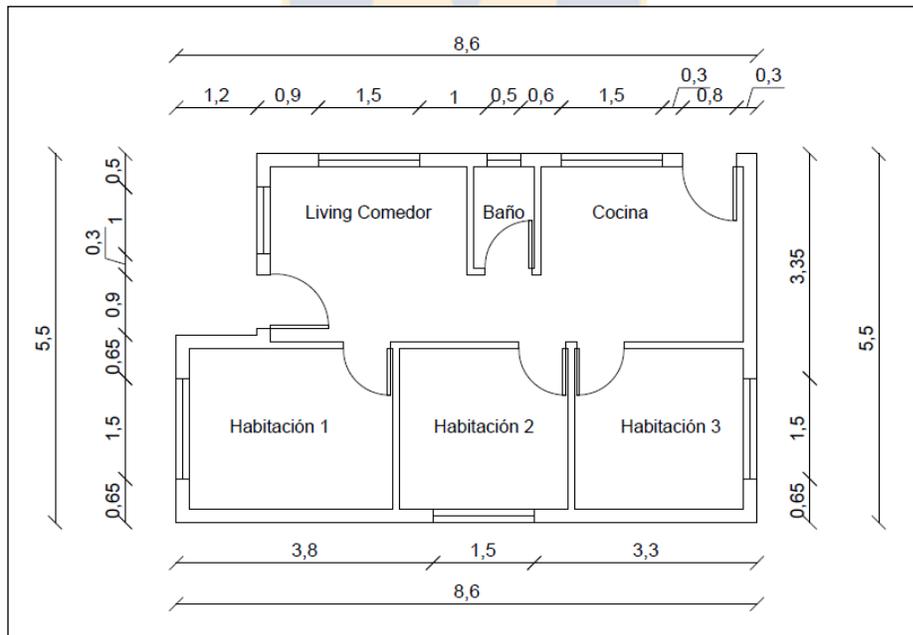


Figure 9: Plano base de vivienda social en estudio.

Fuente: Vasco, D.A. et al., 2017.

La ciudad de Concepción se encuentra dentro de la zona 4 establecida en la Reglamentación Térmica de la ordenanza general de urbanismo y construcción en el artículo 4.1.10 lo que le asigna requerimientos mínimos para la aislación térmica de una vivienda como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros normativos para envolvente térmico establecidos en reglamentación térmica.

| ZONA | TECHUMBRE | | MUROS | | PISOS VENTILADOS | |
|------|-----------|-------|-------|-------|------------------|-------|
| | U | Rt | U | Rt | U | Rt |
| | W/m2K | m2K/W | W/m2K | m2K/W | W/m2K | m2K/W |
| 1 | 0,84 | 1,19 | 4,0 | 0,25 | 3,60 | 0,28 |
| 2 | 0,60 | 1,67 | 3,0 | 0,33 | 0,87 | 1,15 |
| 3 | 0,47 | 2,13 | 1,9 | 0,53 | 0,70 | 1,43 |
| 4 | 0,38 | 2,63 | 1,7 | 0,59 | 0,60 | 1,67 |
| 5 | 0,33 | 3,03 | 1,6 | 0,63 | 0,50 | 2,00 |
| 6 | 0,28 | 3,57 | 1,1 | 0,91 | 0,39 | 2,56 |
| 7 | 0,25 | 4,00 | 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 (MINVU), 2006].

A partir de la entrada en vigencia del plan de prevención y descontaminación atmosférica de las comunas del Concepción metropolitano (D.S. N°6/2018) a finales del año 2019, se hace exigencia que las viviendas construidas posteriormente presenten nuevos estándares de transmitancia térmica para su envolvente térmico, siendo estos muy inferiores a los exigidos en la normativa establecida por la reglamentación térmica. Es por esto que la SEREMI de Vivienda y Urbanismo, focalizará en las comunas de Concepción Metropolitano, la entrega gradual de al menos 20.000 subsidios especiales para el Acondicionamiento Térmico de las viviendas existentes, en la zona de aplicación del Plan, dentro del plazo de 10 años. Esta normativa establece los parámetros señalados en la Tabla 4, los cuales fueron comparados de manera posterior con los resultados obtenidos en el estudio.

Tabla 4. Valores de Transmitancia térmica máxima de la envolvente térmica (U), y de R100 mínimo del material aislante térmico para elementos de techo, muro y piso ventilado.

| Elemento | Estandar | Valor |
|----------------|---|-------|
| Techo | Valor U [W/(m ² K)] | 0,33 |
| Muro | | 0,60 |
| Piso ventilado | | 0,60 |
| Puerta | | 1,70 |
| Techo | Valor R100 [(m ² K)/W] x 100 | 303 |
| Muro | | 167 |
| Piso ventilado | | 167 |

Fuente: Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitana. (D.S. N°6/2018, Ministerio del Medio Ambiente, 2018).

3.2 Objetivo 1: Selección de tipologías y aislantes

3.2.1 Selección de tipología de vivienda

Para la selección de las tipologías de vivienda se realizó un análisis bibliográfico de variados estudios científicos enfocados en la zona sur del país, con la finalidad de determinar las 2 materialidades presentes en la ciudad de concepción que sean lo más representativas en cuanto a viviendas sociales en el área de estudio como se muestra en la Figura 10.

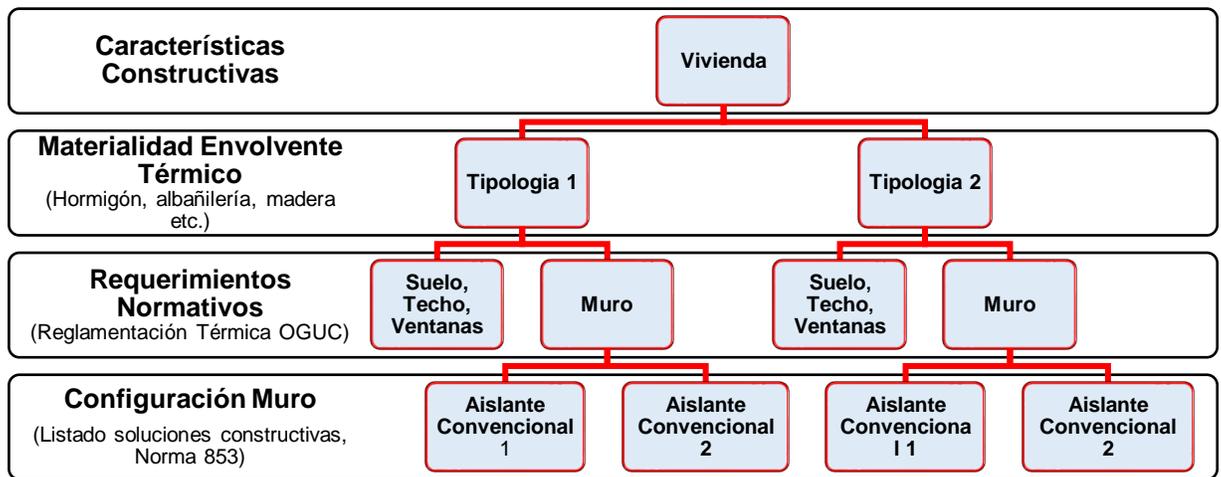


Figura 10: Esquema de selección de tipología de vivienda.

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior fue posible determinar mediante el estudio realizado por Escorcía et al.,2012, que existe cerca de un 77% de viviendas en la región del Biobío construidas con albañilería reforzada como materialidad de la envolvente, siendo esta la predominancia seguida por aquellas viviendas con una envolvente construida con madera en un 18%.

Posterior a esto se realizó una revisión del Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, el cual es un estándar normativo que señala las distintas tipologías de vivienda según su materialidad y aislantes que la componen como, a su vez, la transmitancia que estas mantienen, las cuales al mismo tiempo están elaboradas y certificadas según lo que señala la norma NCh 853, para así lograr establecer las configuraciones de muro según tipología utilizadas posteriormente en el balance energético.

Si bien, la nueva exigencia por parte del Plan de prevención y descontaminación atmosférica para las comunas de Concepción metropolitano establece nuevos

estándares de transmisión térmica para el envolvente térmico de la vivienda, el listado de soluciones constructivas de donde serán escogidas tanto las tipologías como los aislantes convencionales a considerar para la posterior comparación con el aislante en estudio que no posee estos estándares actualizados, lo que presenta dificultades a la hora de realizar el análisis energético del presente informe, por ende, se utilizaron las exigencias normativas establecidas para la zona climática 4 que establece la reglamentación térmica de la OGUC.

3.2.2 Selección aislantes convencionales

Se realizó una verificación de datos en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014, de donde de cada tipología de vivienda seleccionada mediante bibliografía, se buscó aquellas 2 configuraciones de muro que tuvieran el valor de transmitancia más cercana a la mínima establecida en muros para la zona 4 (1,7 W/m²K), donde adicionalmente fue posible escoger los aislantes convencionales para cada tipo de materialidad. Por ende, se obtuvo como resultado 2 aislantes para cada una de las 2 tipologías antes seleccionadas, tal como señala la Tabla N° 5.

Tabla 5: Configuraciones de muros escogidos por tipología con su respectivo aislante convencional.

| Tipología | Aislante | Transmitancia térmica muro/ Valor U (W/m²K) | Código listado soluciones constructivas |
|--------------------|------------------------|---|--|
| Albañilería | Poliestireno Expandido | 1,51 | 1.2.G.B.A1.7 |
| | Poliuretano Expandido | 1,26 | 1.2.G.B.A1.8 |
| Madera | Lana Mineral | 1,44 | 1.2.M.C24.28 |

| | | | |
|--|---------------------------|------|--------------|
| | Poliestireno Expandido | 0,77 | 1.2.M.C24.30 |
|--|---------------------------|------|--------------|

Fuente: Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014.

Las configuraciones escogidas para cada tipología (disponibles en el Anexo I) son determinadas en base a la transmitancia térmica del muro y el aislante que la compone, por ende, suelen haber diferencias en las demás capas que la configuran el muro, donde para el caso de estudio de la tipología de albañilería ocurre que se mantiene una configuración con los mismos materiales dispuestos de manera exacta con la distinción del aislante térmico en ocupación, caso contrario a la tipología de madera en donde las capas que componen los muros se diferencian tanto en la capa exterior como en la disposición entre capas del aislante térmico.

Una vez establecidas las configuraciones se realizó una búsqueda de las propiedades físicas en la norma chilena NCh 853, 2007, las cuales se muestran en la Tabla N° 6.

Tabla 6: Especificaciones físicas de las capas que configuran los muros por tipología y aislante convencional.

| Tipología Albañilería – Configuración Muro Poliestireno - Poliuretano | | | | |
|--|---------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Capa Muro | Espesor (mm) | Densidad (Kg/m3) | Conductividad (W/ m-K) | Calor específico (J/Kg-K) |
| Estuco Cemento | 15 | 520 | 0.33 | 2040 |
| Ladrillo | 143 | 1200 | 0.81 | 795.5 |
| Poliestireno Expandido/ Poliuretano Expandido | 10/10 | 10/25 | 0.043/0.027 | 1400/1590 |

| | | | | |
|---|---------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Yeso Cartón | 10 | 700 | 0.26 | 896 |
| Tipología Madera – Configuración Muro Lana Mineral | | | | |
| Capa Muro | Espesor (mm) | Densidad (Kg/m3) | Conductividad (W/ m-K) | Calor específico (J/Kg-K) |
| Mortero | 25 | 1858 | 1.35 | 840 |
| Capa de Aire* | 36.2 | - | - | - |
| Lana Mineral | 40 | 40 | 0.042 | 1030 |
| Yeso Cartón | 15 | 700 | 0.26 | 896 |
| Tipología Madera – Configuración Muro Poliestireno | | | | |
| Capa Muro | Espesor (mm) | Densidad (Kg/m3) | Conductividad (W/ m-K) | Calor específico (J/Kg-K) |
| Fibrocemento | 6 | 300 | 0.23 | 1000 |
| Capa de Aire* | 76.2 | - | - | - |
| Poliestireno Expandido | 10 | 15 | 0.041 | 1400 |
| Yeso Cartón | 10 | 700 | 0.26 | 896 |

*La capa de aire no presenta datos de estas propiedades físicas en la norma chilena NCh 853, por lo cual se hizo utilización de la información entregada en el software de simulación.

Fuente: Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014; NCh 853:2007.

Adicional a esto se estableció que el aislante de corteza de eucalipto en estudio será comparado con los seleccionados, de forma que se pueda obtener el mejor desempeño tanto térmico como ambientalmente, es por esto que se decidió utilizar cada uno de los 4 aislantes obtenidos por Daza K, 2017, siendo estos diferenciados por su espesor, su densidad y su transmitancia térmica.

Tabla 7: Especificación técnica de paneles aislantes flexibles de corteza de eucalipto.

| Propiedad | Unidad | Valor | | | |
|--|---------------------|-----------------|-------|-------|-------|
| | | 25 | 50 | 75 | 100 |
| 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 | | | |

Fuente: Daza K., 2017.

3.3 Objetivo 2: Modelado y selección de parámetros y variables de la vivienda

Se realizó un modelado de la vivienda y sus propiedades en el software Design Builder utilizando la información antes recopilada de las tipologías y configuraciones de muro, como a su vez realizando variaciones en estas donde se utilizan los aislantes de corteza de eucalipto elaborados por Daza K., 2017 sustituyendo al aislante convencional.

Los parámetros de ingreso en el software Design Builder previo balance energético fueron realizados en conformidad con lo dispuesto en los Estándares de Construcción Sustentables para las Viviendas de Chile Tomo I Salud y Bienestar y, Tomo II Energía realizado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, con la finalidad de obtener los resultados más cercanos a la realidad en cuanto a estas regulaciones y estándares existentes.

3.3.1 Modelo y variables constructivas

Como primera medida se realiza un modelado de la vivienda en el software, el cual está basado en la vivienda de estudio de Vasco D.A et al, 2017, realizando un dibujo manual en el software de la planta de la vivienda, dándole una altura de 2,3 m a los muros y haciendo un modelado del techo a dos aguas con aleros de 30 cm.

Posteriormente a este modelo, se ingresó las variables de transmitancia de suelo y techo, que se considerarán constantes para las distintas tipologías, siendo una constante dentro del marco del balance energético.

Las variables fijas escogidas para el balance en cuanto a techo y suelo son basadas principalmente a que estos mantengan una transmitancia térmica de valor igualitario en cada balance de energía a realizar, condicionando que el balance demuestre de manera más acertada los cambios de demanda energética requeridas en función a los diferentes muros y aislantes ocupados y estas se fijaron en base a los estándares de transmitancia mínima establecidos en el art. 4.1.10 de la OGUC para la zona 4 en aquellas partes del envolvente térmico de la vivienda que correspondan, donde para el caso de estudio solo existe normativa en cuanto a techumbres, dejando la variable del suelo a criterio del usuario, para lo cual se utilizaron los índices de transmitancia para suelos no ventilados otorgados en los estándares de construcción sustentable del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

- ✓ Transmitancia térmica suelos no ventilados (U): 3,315 W/m²K
- ✓ Transmitancia térmica techumbre (U): 0,38 W/m²K

Este modelado se realizó con una orientación de la vivienda en la cual exista la menor cantidad de entradas de calor exterior, por tanto, se ubicó de manera que la fachada con mayor cantidad de puertas y ventanas estén ubicadas con mirada a la zona Sur, esto ya que genera la mayor sobrestimación de los resultados, es

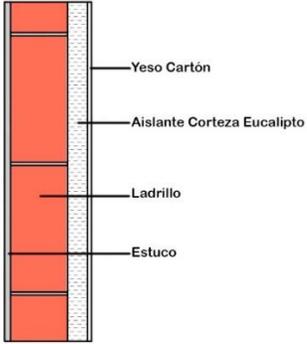
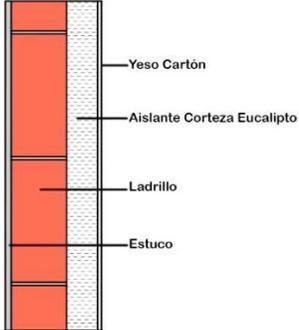
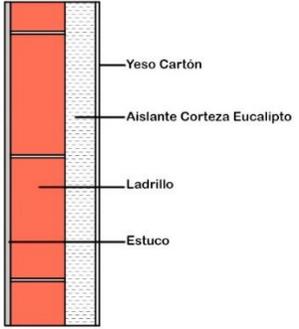
decir, demuestra la mayor demanda energética que puede requerir la vivienda al tener menor entrada de luz solar.

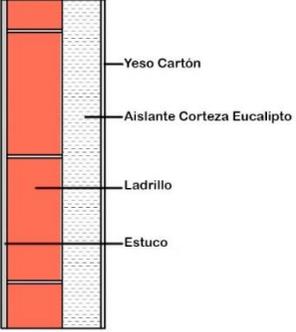
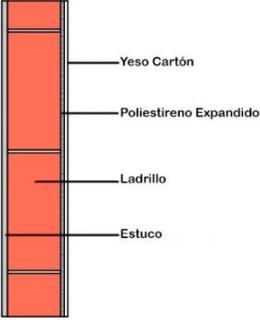
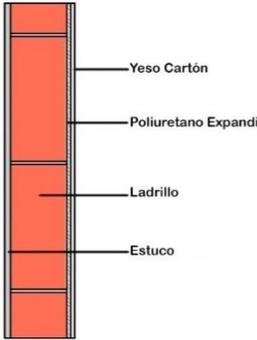
A continuación, se ingresaron al software las distintas configuraciones de muro escogidas en el listado de soluciones constructivas determinadas en el objetivo anterior, de manera que existan dos por cada tipología, las cuales son en base al aislante convencional que estas utilizan. A las cuales se les realizó una sustitución del aislante, de manera que se generaran nuevas configuraciones basadas en las anteriormente mencionadas; pero que utilicen las 4 versiones del aislante flexible de corteza de eucalipto realizado por Daza K., 2017 que se muestra para el caso de la tipología de albañilería en la tabla 8 (Tipología madera en Anexo II) los cuales varían en su espesor y densidad. Dando como resultado 4 escenarios nuevos a cada configuración de muro, a los cuales se realizó un balance energético.

Esta diferencia de espesores de sus aislantes en conjunto con el espesor de muro determinará una variación en cuanto a los metros cuadrados de superficie interior construida en cada caso a considerar, lo cual se verá reflejado en los resultados obtenidos en el posterior balance energético; pero sin ser categóricos dentro del resultado, ya que estos serán demostrados en base a la unidad de kWh por metro cuadrado y no por la totalidad de la superficie.

Tabla 8: Transmitancia y resistencia térmica de muros con tipología albañilería.

| Tipología Albañilería Configuración Poliestireno exp. y Poliuretano exp. | | | |
|---|---------------------------|--|--------------------------------------|
| Aislante | Configuración Muro | Transmitancia térmica muro (W/m²K) | Resistencia térmica R100 muro |
| | | | |

| | | | |
|--|---|--------------|--------------|
| <p>Aislante eucaliptus 50mm</p> |  <p>Yeso Cartón Aislante Corteza Eucalipto Ladrillo Estuco</p> | <p>0.649</p> | <p>154.2</p> |
| <p>Aislante eucaliptus 80mm Densidad 50 Kg/m3</p> |  <p>Yeso Cartón Aislante Corteza Eucalipto Ladrillo Estuco</p> | <p>0.461</p> | <p>217.0</p> |
| <p>Aislante eucaliptus 80mm Densidad 75 Kg/m3</p> |  <p>Yeso Cartón Aislante Corteza Eucalipto Ladrillo Estuco</p> | <p>0.477</p> | <p>209.7</p> |

| | | | |
|---|---|--------------|--------------|
| <p>Aislante eucaliptus 100mm</p> |  | <p>0.406</p> | <p>247.1</p> |
| <p>Poliestireno Expandido</p> |  | <p>1.508</p> | <p>66.3</p> |
| <p>Poliuretano Expandido</p> |  | <p>1.253</p> | <p>79.8</p> |

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la transmitancia y resistencia térmica (R100) obtenida para cada uno de los muros con sus diferentes configuraciones, es propicio resaltar que los aislantes convencionales si bien existen valores de transmitancia que están bajo el amparo de la normativa regulatoria del artículo 4.1.10 de la OGUC en la zona

4 al ser menores al $1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, al igual que los valores de R100 son mayores a 59, estas son muy lejanas en cuanto a las nuevas especificaciones térmicas requeridas desde la entrada en vigencia del plan de prevención y descontaminación atmosférica (PPDA) D.S.N°6/2018, del Ministerio del Medio Ambiente para el concepción metropolitano. En cambio, aquellos muros a los que se realiza un cambio de aislante por uno fabricado en base a fibras naturales de corteza de eucalipto se encuentran dentro o cercano a estos valores máximos de transmitancia y resistencia térmica.

3.3.2 Variables adicionales

Las siguientes variables fueron utilizadas tal como se establece los Estándares de Construcción Sustentables para las Viviendas de Chile Tomo I Salud y Bienestar y, Tomo II Energía realizado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Ya que es la manera que establece la normativa actual para el mejor desempeño de un balance energético de una vivienda.

Ocupación: Se utilizó una ocupación en concordancia con la NCh 3308:2013, la cual determina un mínimo de dos personas por vivienda, más una por cada dormitorio, siendo así para el caso de estudio una vivienda de 3 dormitorios con 5 personas. Se estableció por tanto en el software que dichas personas proporcionarán una carga sensible de $98,4 \text{ W}$ durante el día (7 a 22 horas) y 82 W durante la noche (22 a 7 horas), utilizando el calendario que facilita el mismo documento.

Iluminación: Se consideraron $1,5 \text{ W/m}^2$ de potencia instalada. Con un horario de encendido y apagado de luces como se señala en la tabla 2.3 del documento de estándares de construcción sustentable. Aunque entendiendo que para el balance energético en desarrollo esto es despreciable debido a que no genera aumentos en cuanto a la demanda energética por concepto de calefacción relacionado a los muros y es más bien una variable constante.

Infiltraciones: Se asumió un intercambio constante de aire de 1 renovación de aire por hora (RAH).

Climatización: El cálculo de demanda energética para enfriamiento y calefacción, se realizó considerando los límites de temperatura mensuales señalados en la tabla 2.5 del documento, tomando como base de cálculo los 18 °C de mínima para el mes de Julio, debido a que el software Design Builder no permite establecer un calendario de temperaturas en este segmento, por tanto, se escogió la mínima señalada en todo el periodo escogido para el balance energético. Esto es determinado en base al método de confort adaptativo de Dear & Brager (1998), señalado en ASHRAE Fundamentals, capítulo "Thermal Comfort", aplicando una banda de +2,5°C a -2,5°C, con respecto de la temperatura media de confort. La demanda térmica fue calculada para alcanzar los niveles de confort de manera permanente, independiente del horario real de uso la vivienda

3.4 Objetivo 3: Balance energético de vivienda simulada

3.4.1 Determinar demanda energética de la vivienda

Una vez establecidos las distintas variables se realizó el balance energético de cada una de las opciones de configuración de muro para cada tipología.

En este estudio, se compararon 6 opciones en tipologías de albañilería, esto debido a que tanto la configuración con aislante de Poliestireno expandido como aquella con poliuretano expandido mantienen la misma configuración de muro, por ende, la variación del aislante a aquellos a comparar fabricados con corteza de eucalipto obtendrá resultados iguales en ambos aislantes convencionales.

Para el caso de la tipología de madera (tabiquería), se dispuso de un total de 10 opciones, esto ya que, al existir dos configuraciones de muro distintas, una para

cada aislante convencional considerado, las opciones en las que se sustituyen con aislante de corteza de eucalipto obtendrán resultados distintos.

Estos balances energéticos se realizaron en el *software Design Builder* a través de su herramienta de simulación, en la cual se estableció un periodo anual de datos climáticos para su análisis perteneciente al año 2019 otorgados en el mismo software por la AHSRAE a través de su centro de datos meteorológicos donde se realiza una descarga automática de la información actualizada de los datos reportados por la estación meteorológica: 856820 ubicada en Concepción. En este caso, se realizó una acotación a los datos que señalen de mejor forma los gastos energéticos de calefacción de una vivienda, por ende, se les hizo un ajuste a los datos con la finalidad de solo demostrar aquellos pertenecientes a los meses de menor temperatura como a su vez a aquellos que pertenecen al periodo invernal, con la finalidad de señalar los periodos reales de uso de calefacción en una vivienda en la zona, seleccionando como fecha de inicio de este periodo al día 1 de abril y fecha de término el día 30 de septiembre, siendo un total de 6 meses.

3.4.2 Comparación de gasto energético e interpretación

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos en cada tipología de vivienda con sus respectivas configuraciones, tanto de la demanda energética anual (kWh/año) para la vivienda completa como por metro cuadrado de superficie (kWh/m²año).

Además, se determinaron los porcentajes de disminución que posee cada aislante de fibra natural de corteza de eucalipto en comparativa con los aislantes convencionales según cada configuración de muro en estudio (4 en total) utilizando un cálculo simple de porcentaje a través de la siguiente fórmula:

$$x \% = 100 - \frac{\frac{kWh}{año} \text{ Aislante de Eucalipto} \cdot 100}{\frac{kWh}{año} \text{ Aislante Convencional}}$$

En donde las variables de kWh/año de aislante de corteza de eucalipto fueron seleccionadas según los resultados de la simulación energética pertinente por configuración de muro (1 en albañilería y 2 en madera) para cada espesor y densidad en estudio.

3.4.4 Análisis de sensibilidad de balance energético

Posterior al balance energético se realizó un análisis de sensibilidad de datos, utilizando las mismas tipologías de construcción; pero aplicando cambios en sus variables que demuestran mayor influencia en el comportamiento energético.

Es por tanto, que se decidió utilizar cambios en la orientación de la vivienda, debido a que como señala Vera S; Ordenes M, 2002, existe una amplia influencia en cuanto a la entrada de luz solar en la vivienda y, por tanto, la orientación de las superficies con mayor entrada de calor diario demuestran considerables variaciones en los resultados de demanda energética, donde en este caso particular solo se consideraron las orientaciones Norte, Este y Oeste para la comparación, sin involucrar orientaciones intermedias.

Por otra parte también se realizó un análisis de sensibilidad haciendo cambio de la zona climática en la que se encuentra ubicada la vivienda, en este caso se compararon las zonas térmicas 4 (Concepción) y 3 (Santiago de Chile), variando la temperatura en el periodo de tiempo seleccionado (Abril a septiembre), en donde se utilizó los datos meteorológicos que entrega el mismo software Design Builder para la comuna de Pudahuel en Santiago y Concepción.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Demanda de energía en las tipologías de viviendas

Las demandas energéticas en la vivienda simulada demostraron curvaturas de similar comportamiento; pero de distinta magnitud, lo cual es atribuible a que no existe variación en las temperaturas diarias de la zona climática seleccionada para la realización de la simulación, en este caso la ciudad de Concepción. Por ende, los requerimientos térmicos muestran variaciones que dependen intrínsecamente de las variables de transmitancia y resistencia térmica del muro, lo cual es dependiente de la configuración del muro y su aislación tal como se señaló anteriormente.

4.1.1. Tipología Albañilería Poliéstireno exp. y Poliuretano exp.

En cuanto a la tipología 1 Albañilería, se encontró una alta influencia térmica en el uso del aislante térmico de corteza de eucalipto, debido a que demostró disminuir sustancialmente la demanda energética requerida por la vivienda, siendo en promedio alrededor de 480 kWh anual de diferencia con aquellos muros que cuentan con aislación de poliuretano expandido y 360 kWh/año con aquellos de poliuretano expandido, tal como muestra la Tabla 9.

Tabla 9: Demanda energética anual y por m² de vivienda de albañilería.

| Tipología Albañilería - Demanda Energética (kWh/m ² año) | | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Poliéstireno | Poliuretano |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 10mm | 10mm |
| Densidad | 25 Kg/m ³ | 50 Kg/m ³ | 75 Kg/m ³ | 100 Kg/m ³ | 10 Kg/m ³ | 25 Kg/m ³ |
| Mes | | | | | | |
| Abril | 134,46 | 125,93 | 124,65 | 119,51 | 165,87 | 156,22 |
| Mayo | 248,83 | 233,61 | 233,67 | 226,83 | 311,77 | 293,05 |
| Junio | 317,80 | 298,74 | 299,46 | 291,38 | 397,59 | 374,18 |
| Julio | 349,67 | 329,04 | 329,90 | 321,21 | 436,37 | 410,88 |
| Agosto | 298,44 | 280,26 | 280,40 | 272,27 | 372,9 | 350,88 |
| Septiembre | 244,91 | 229,56 | 228,96 | 221,33 | 305,03 | 287,16 |

| | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Demanda anual (kWh) | 1594,11 | 1497,14 | 1497,04 | 1452,53 | 1989,53 | 1872,37 |
| Área Superficie (m2) | 34,68 | 33,93 | 33,93 | 33,43 | 35,69 | 35,69 |
| kWh/m2 Superficie | 45,96 | 44,12 | 44,12 | 43,45 | 55,74 | 52,46 |

Fuente: Elaboración propia.

Comparando entre los cuatro escenarios de aislante de corteza de eucalipto se obtuvo una disminución de la demanda energética de manera lineal, arrojando una disminución de 103 kWh/año entre el aislante de espesor 50mm y aquellos de 80mm, de alrededor de 45 kWh/año de aquellos de 80mm con el de mayor espesor (100mm).

Mientras mayor sea el espesor y la densidad del aislante térmico menor serán los requerimientos energéticos, como se muestra en la Figura 11. Este comportamiento se justifica por los factores señalados anteriormente de transmitancia térmica del muro y no de la conductividad térmica del aislante. Donde la transmitancia térmica de los muros de albañilería configurados con aislante de eucalipto es de 0,649 en el caso del con menor espesor, siendo mucho menor que los 1,508 del poliestireno expandido o los 1,253 del poliuretano expandido. Mientras que, por otra parte, la conductividad térmica del aislante de eucalipto oscila entre 0,046 y 0,049 (W/m-K), mientras que el poliestireno posee 0,043 W/m-K y el poliuretano expandido 0,027 W/m-K, lo cual en términos de resultados de demanda energética es contrario a la perspectiva general, en donde un aislante de menos conductividad es mejor aislante. Este comportamiento se debe a que el aislante de corteza de eucalipto tiene espesores mayores y un calor específico más alto, por tanto, debe existir una mayor entrada de calor para generar cambios de temperatura en este.

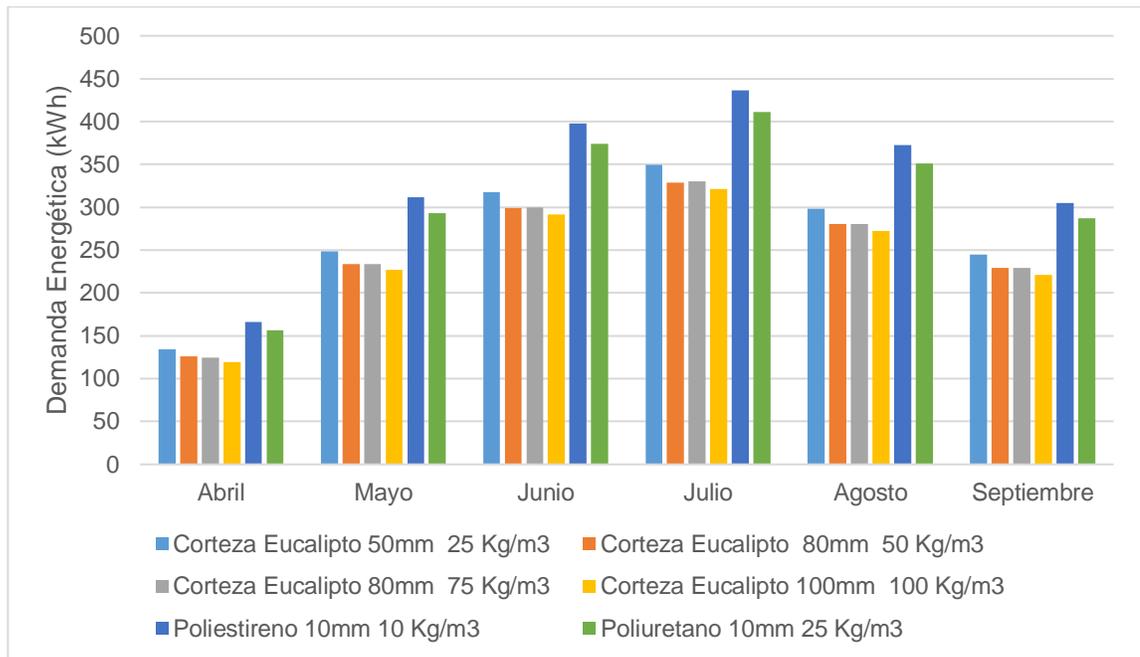


Figura 11: Tipología Albañilería - Demanda Energética (kWh/mes).

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los valores máximos de demanda energética por calefacción establecidos en los estándares de soluciones constructivas del ministerio de vivienda y urbanismo, los resultados arrojan que, en todos los casos de muro de albañilería (45,96-52,46 kWh/m²año), incluyendo aquellos confeccionados con aislantes convencionales mantienen valores menores a los 59 kWh/m²año propuestos para el año 2040 (Ver Anexo III). Esto significa que todos son admisibles dentro del aspecto de construcciones sustentables. Donde se ven reflejadas las diferencias de la misma manera que lo anteriormente dispuesto, siendo entre 10 y 12 kWh/m²año de diferencia de demanda energética entre el aislante de corteza de eucalipto con el poliestireno expandido y entre 7 y 9 kWh/m²año en relación al poliuretano expandido.

Los resultados mostrados en la figura 12 demuestran que en el caso comparativo entre el aislante fabricado con fibras naturales con poliestireno expandido existe

una alta disminución de la demanda energética anual en la vivienda independiente del espesor y densidad del aislante en comparación, donde en el menor de los casos es cercano al 20 %, siendo un claro ejemplo que en términos de eficiencia energética el aislante es más que solo competitivo, sino que a su vez logra mejores resultados.

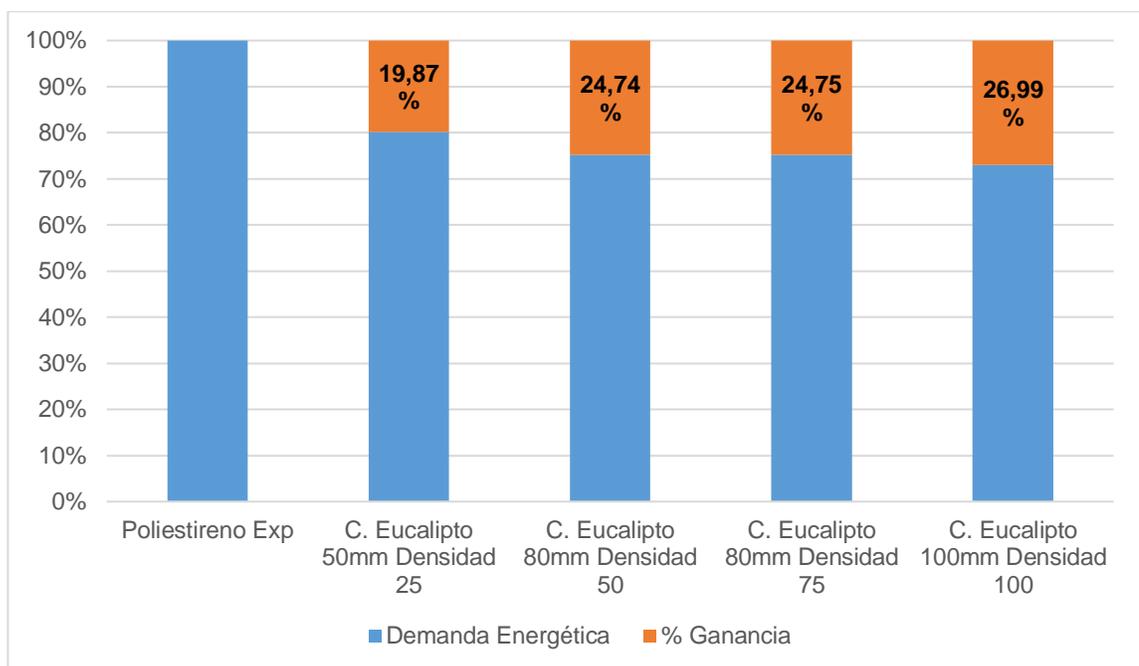


Figura 12: Porcentaje de disminución de la demanda energética al sustituir poliestireno expandido por aislantes de corteza de eucalipto.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los resultados comparativos con el aislante de poliuretano expandido según se muestra en la figura 13, señalan menores porcentajes de disminución de la demanda energética en la vivienda que con aislante de poliestireno expandido; pero que a su vez siguen siendo elevados, siendo en el caso del aislante de fibra de menor espesor donde se encuentra la menor

disminución de alrededor de 15 %, lo cual al igual que en los resultados anteriores demuestran la alta competitividad y eficiencia térmica del aislante.

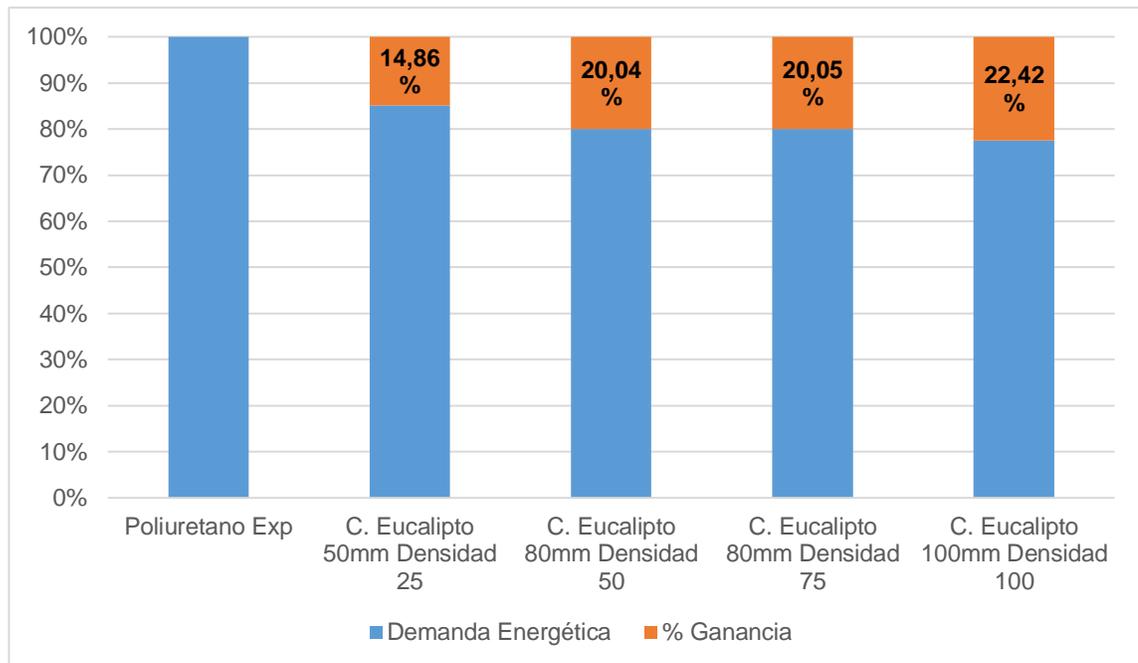


Figura 13: Porcentaje de disminución de la demanda energética al sustituir poliuretano expandido por aislantes de corteza de eucalipto.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los resultados comparativos con el aislante de poliuretano expandido señalan menores porcentajes de disminución de la demanda energética en la vivienda que con aislante de poliestireno expandido; pero que a su vez siguen siendo elevados, siendo en el caso del aislante de fibra de menor espesor donde se encuentra la menor disminución de alrededor de 15 %, lo cual al igual que en los resultados anteriores demuestran la alta competitividad y eficiencia térmica del aislante.

4.1.2 Tipología Madera Layer Lana Mineral (1)

Los resultados obtenidos en la tipología de madera fueron separados en sus distintas configuraciones de muro, ya que estas no serían comparables y arrojan distintos resultados en la totalidad de los aislantes escogidos.

Para la configuración del muro de madera con lana mineral como aislante, el balance energético demuestra una reducción de la demanda energética de 147,44 kWh/año en promedio utilizando aislante de corteza de eucalipto comparado con la utilización del aislante convencional. Donde aquel con el menor espesor (50 mm) es quien mantiene los valores más cercanos a los obtenidos por el aislante de lana mineral, diferenciándose en unos 48,5 kWh/año y aquel que difiere en mayor cantidad es aquel con mayor espesor, obteniendo una disminución de 240,9 kWh/año tal como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de lana mineral.

| Tipología Madera Lana Mineral - Demanda Energética kWh/m ² año | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | Lana Mineral | |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 40mm |
| Densidad | 25 Kg/m ³ | 50 Kg/m ³ | 75 Kg/m ³ | 100 Kg/m ³ | 40 Kg/m ³ |
| Mes | | | | | |
| Abril | 159,00 | 146,25 | 144,85 | 132,41 | 165,22 |
| Mayo | 267,59 | 251,67 | 251,38 | 237,63 | 275,51 |
| Junio | 335,86 | 318,00 | 318,29 | 303,50 | 344,47 |
| Julio | 369,18 | 350,05 | 350,43 | 334,67 | 378,28 |
| Agosto | 320,17 | 301,93 | 301,67 | 285,86 | 328,88 |
| Septiembre | 270,40 | 253,32 | 252,45 | 236,56 | 278,36 |
| Total (kWh) | 1722,2 | 1621,22 | 1619,07 | 1530,63 | 1770,72 |
| Área Superficie (m²) | 37,02 | 36,25 | 36,25 | 35,73 | 37,28 |
| kWh/m² Superficie | 46,52 | 44,72 | 44,66 | 42,84 | 47,50 |

Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar que al igual que en los resultados arrojados en la tipología de albañilería, la disminución de la demanda energética se da de manera lineal de un aislante de corteza de eucalipto a otro de manera lineal mientras aumenta el espesor como se demuestra en la Figura 14.

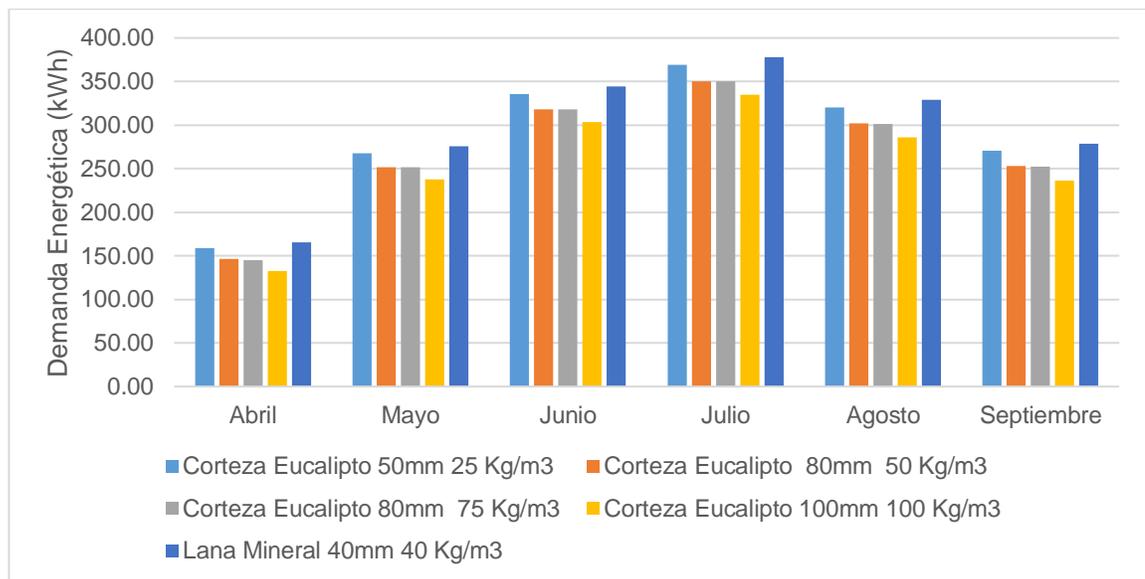


Figura 14: Tipología Madera Lana Mineral - Demanda Energética (kWh/mes).

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en relación a los valores de demanda energética máxima esperada bajo los estándares de construcciones sustentables nos demuestra que en la totalidad de los casos estos alcanzan valores cercanos a los esperados entre el año 2040 y 2050, de la misma manera que en la tipología anterior; pero obteniendo una diferencia mucho menor en cuanto a la demanda energética por m^2 , de cerca de $1 \text{ kWh/m}^2\text{año}$ en el escenario del aislante de 50 mm y de alrededor de $5 \text{ kWh/m}^2\text{año}$ en el aislante de espesor más amplio.

Al igual que en la tipología anterior, se realizó un análisis porcentual de disminución de la demanda energética anual, lo que arrojó los resultados de la

Figura 15. Estos resultados demuestran que, en comparación con los aislantes comparados en la tipología anterior, la disminución de la demanda energética se ve bastante acotada cuando se compara con aislación con lana mineral; pero que a su vez mantienen un mejor desempeño térmico el cual se ve acrecentado mientras aumenta el espesor del aislante de fibras naturales de corteza de eucalipto, llegando a lograr disminuciones que van desde cerca del 3% en el aislante de 50mm y de cerca del 14% en aquel con mayor espesor.

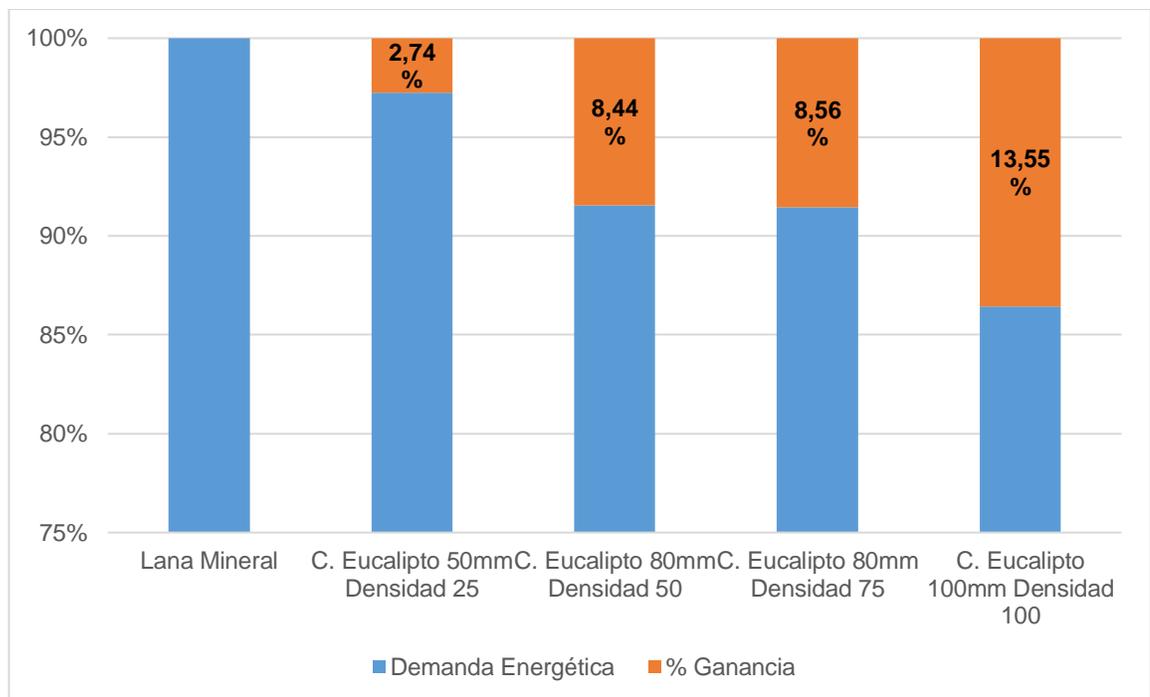


Figure 15: Porcentaje de disminución de la demanda energética al sustituir lana mineral por aislantes de corteza de eucalipto.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Tipología Madera Layer Poliestireno (2)

En el caso de la tipología de madera que tiene una configuración en base a su aislación con poliestireno expandido, los resultados entregados por el software señalan que de la misma manera que en los casos anteriores la disminución de

la demanda energética mantiene la misma correlación entre los aislantes de corteza de eucalipto, siendo cada vez menor mientras se aumenta el espesor.

Se demostró una disminución promedio de 655,88 kWh/año entre el aislante de corteza de eucalipto y el aislante convencional de poliestireno expandido. Siendo la mayor diferencia de 755,72 kWh/año entre el uso del aislante de eucalipto de 100mm y el poliestireno expandido y, la menor de 524 kWh/año con aquel de espesor de 50 mm como se demuestra en la Tabla 11.

Tabla 11: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de poliestireno expandido.

| Tipología Madera Poliestireno- Demanda Energética kWh/m2 año | | | | | |
|---|--------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | Poliestireno | |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 10mm |
| Densidad | 25 Kg/m3 | 50 Kg/m3 | 75 Kg/m3 | 100 Kg/m3 | 15 Kg/m3 |
| Mes | | | | | |
| Abril | 167,17 | 149,27 | 147,84 | 135,94 | 228,55 |
| Mayo | 274,80 | 251,82 | 251,39 | 238,67 | 357,52 |
| Junio | 341,79 | 315,78 | 315,85 | 302,27 | 436,9 |
| Julio | 375,59 | 347,33 | 347,40 | 332,93 | 478,33 |
| Agosto | 327,36 | 300,84 | 300,32 | 285,62 | 422,99 |
| Septiembre | 278,00 | 253,47 | 252,41 | 237,60 | 364,46 |
| Total (kWh) | 1764,71 | 1618,51 | 1615,21 | 1533,03 | 2288,75 |
| Área Superficie (m2) | 36,6 | 35,84 | 35,84 | 35,33 | 37,64 |
| kWh/m2 Superficie | 48,22 | 45,16 | 45,07 | 43,40 | 60,81 |

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en ambos casos anteriores, la disminución de la demanda energética se mantiene de forma lineal entre los aislantes de corteza de eucalipto mientras estos aumentan su espesor, tal como señala la Figura 16.

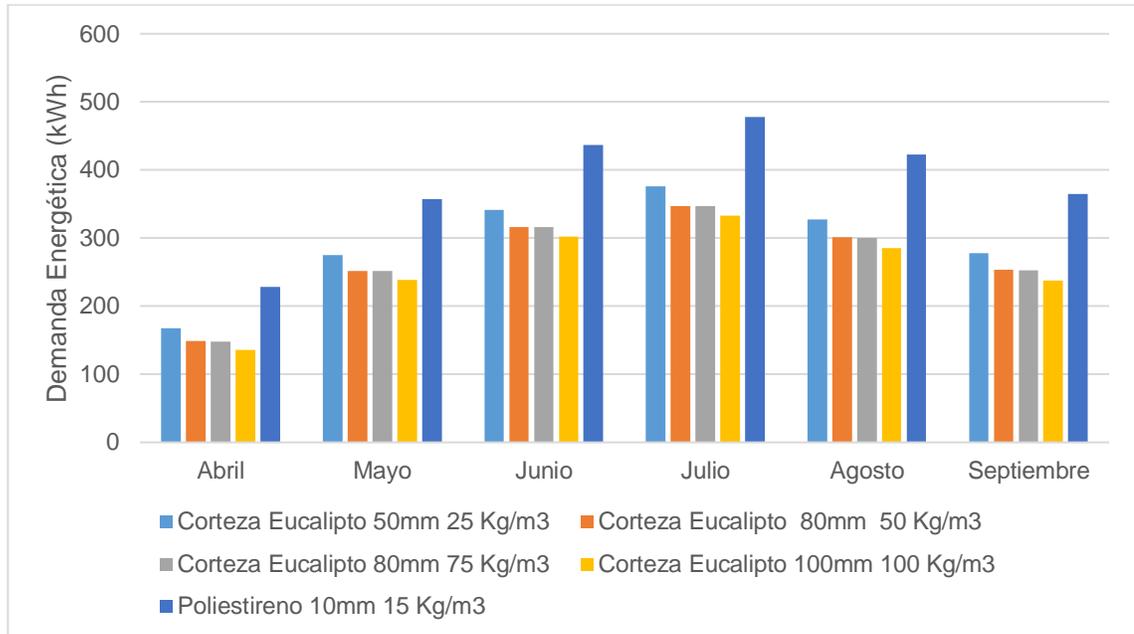


Figura 16: Tipología Madera Poliestireno - Demanda Energética (kWh/mes).

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los valores de demanda energética máxima esperada bajo los estándares de construcciones sustentables al igual que en los casos anteriores, nos demuestra que en la totalidad de casos con aislación de corteza de eucalipto se alcanzan valores cercanos a los esperados entre el año 2040 y 2050, siendo por otra parte el caso de estudio de aislación con poliestireno la que arroja resultados de demanda energética mayores y que se alejan de aquellos esperados en el año 2050. Donde es posible encontrar una mayor diferencia en cuanto a los resultados obtenidos en la misma tipología; pero con la configuración establecida para el uso de lana mineral, mostrando una variación de 12,6 kWh/m²año con el aislante de eucalipto de menor espesor y de 17,4 kWh/m²año con aquel de espesor de 100mm.

Los resultados de la figura 17 señalan que, a diferencia con la comparación pasada en la tipología de madera con configuración de muro y aislante de lana mineral, la demanda energética del aislante de corteza de eucalipto en

comparación con poliestireno expandido en esta tipología se ve ampliamente reducida, alcanzando porcentajes aún mayores que los observados en la comparación en la tipología de albañilería con poliestireno expandido. Siendo estos de casi 23 % para la comparativa con el aislante de menor espesor (50mm) y de sobre 33 % en aquel con mejor desempeño (100mm). Consolidando de esta forma lo analizado anteriormente del gran desempeño que puede llegar a demostrar el aislante en estudio en relación con los aislantes de uso convencional.

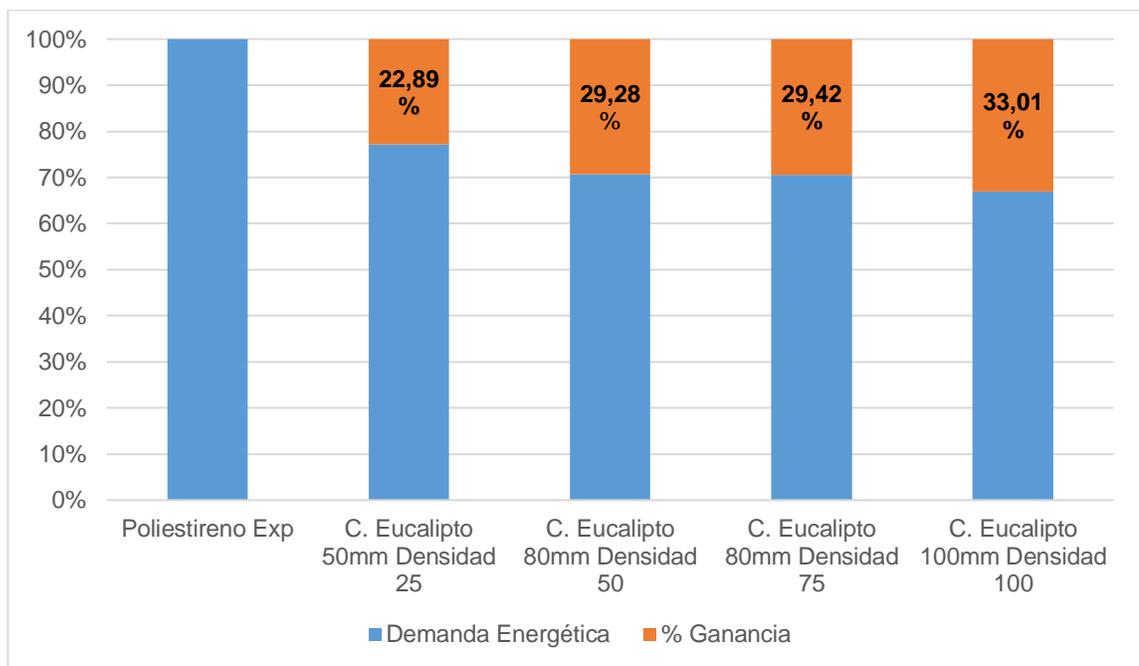


Figura 17: Porcentaje de disminución de la demanda energética al sustituir poliestireno expandido por aislantes de corteza de eucalipto.

Fuente: Elaboración propia.

4.1. Análisis de resultados comparativos entre tipologías

La tipología albañilería al contar en todos los escenarios simulados con una configuración de muro idéntica y solo existir cambios en sus aislantes es más

sencillo demostrar las diferencias de demanda energética existentes entre ellas. Siendo fácil identificar la gran disminución existente entre los aislantes sintéticos utilizados (Poliestireno exp y poliuretano exp) en comparación con los aislantes naturales de eucalipto. Contando con diferencias de hasta 500 kWh/año para el caso de los muros que cuentan con aislación de poliestireno como se muestra en la Figura 18.

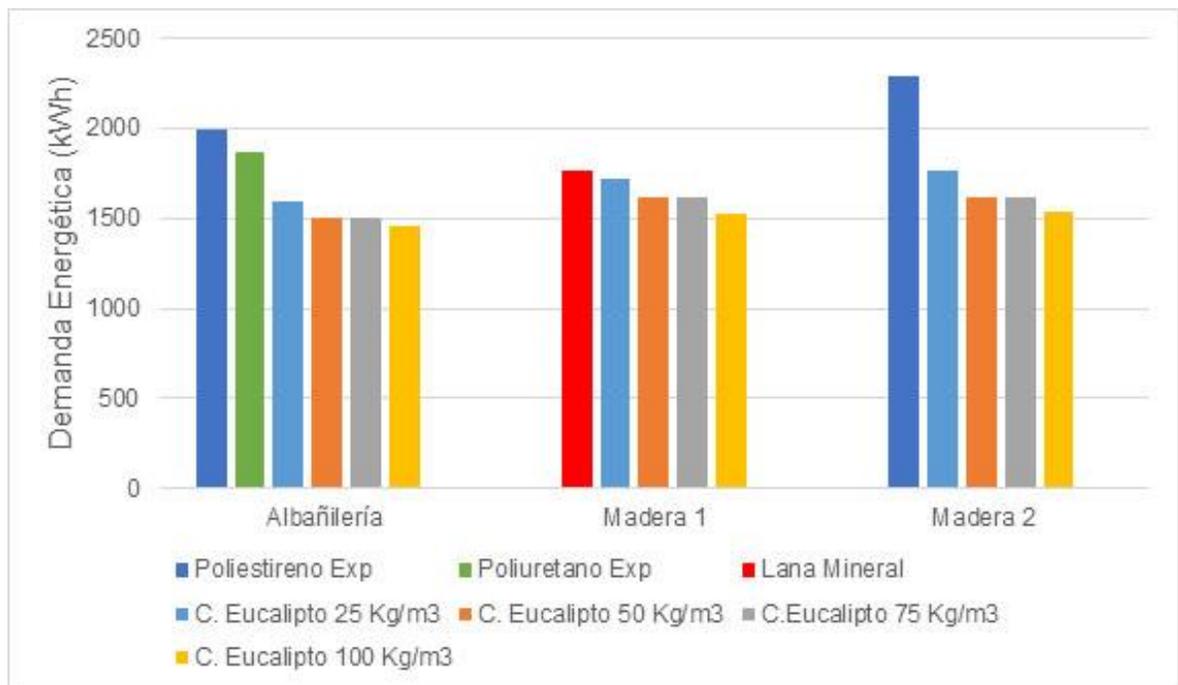


Figura 18: Demanda Energética (kWh/año) por tipología, configuración de muro y aislante.

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, para la tipología de madera, si bien contempla configuraciones de muro distintas (las capas que la componen son diferentes) y los resultados de ambas configuraciones son diferentes estas arrojan valores de demanda energética similares, los cuales son poco apreciables en la Figura 18 debido a que estas constan de diferencias de entre 3 y 42 kWh/año entre la tipología de madera 1 y 2 al hacer uso de aislantes de corteza de eucalipto.

A partir de los resultados anteriores, realizando una comparación entre las demandas energéticas simuladas por tipología, obviando la poca diferencia de ambas configuraciones en la tipología de madera y haciendo observaciones de esta como si fuese un valor único, que se puede apreciar una disminución marcada al hacer uso de aislantes de fibras naturales de eucalipto en sustitución de aislantes sintéticos en ambas tipologías.

Por otra parte, el aislante de lana mineral en la tipología de madera es quien demuestra un mejor desempeño energético, obteniendo valores de demanda energética similares a los obtenidos con el aislante de fibras de eucalipto, por el contrario, quien demuestra peor desempeño es el aislante de poliestireno expandido, obteniendo la mayor demanda energética tanto en la tipología de vivienda de albañilería como en la de madera, teniendo diferencias de entre los 395,4 - 524 kWh/año con su contraparte de aislación de corteza de eucalipto de menor espesor.

Si bien, gran importancia de los resultados anteriormente dispuestos va de la mano con los aislantes ocupados en las simulaciones energéticas, las variables térmicas de las capas que componen los muros son parte fundamental, donde de los resultados obtenidos es importante resaltar que la influencia de la conductividad térmica del aislante de corteza de eucalipto, siendo mayor que aquella que mantienen los aislantes convencionales en comparación, no condiciona una demanda energética ligeramente mayor como debiese esperarse. Esto es particularmente atribuible a los espesores utilizados para aislación, en donde, los aislantes de corteza de eucalipto utilizados para simulación mantienen entre 4 y 9 cm de diferencia con aquellos de origen sintético y de entre 1 y 5 con el aislante de fibra mineral. Lo que, en términos de simulación, generó en el muro una disminución de la transmitancia térmica, otorgándole un mejor desempeño térmico.

4.2. Análisis de sensibilidad

Existe influencia de las condicionantes atmosféricas en los resultados de las simulaciones energéticas obtenidas, particularmente de las zonas de asolamiento de la vivienda en estudio, debido a que existen ganancias térmicas por irradiación solar, las cuales pueden generar alzas o disminuciones de la demanda energética de la vivienda al realizar un cambio de orientación de los muros con mayor porcentaje de entradas de luz solar (ventanas).

A su vez, las variables climáticas de la zona dispuesta para la simulación energética, en conjunto con las variables de transmitancia térmica de la vivienda, tienen influencia directa en los resultados obtenidos, sin embargo, al existir distintas zonas climáticas en el país que mantienen la misma normativa térmica, es importante demostrar si los resultados obtenidos son acordes al hacer cambio de la zona climática de simulación.

Cambio Orientación, resultado eficiencia energética

En el análisis de sensibilidad realizado en base a los cambios de orientación de la vivienda, con la finalidad de observar si se mantiene la misma variabilidad de demanda energética en los distintos usos de aislación.

Los resultados para cada tipología y configuración de muro a las cuales se les realiza un cambio de la orientación de la vivienda, se encuentran disponibles en las tablas del Anexo IV, donde se observa la misma relación de disminución de demanda energética mientras el espesor del aislante de corteza de eucalipto va aumentando en cada escenario de orientación aplicada (Norte, Este y Oeste), y a su vez el porcentaje de disminución en comparación con los aislantes convencionales se mantiene similar.

Para los efectos demostrativos se mostrará el comportamiento del aislante de eucalipto de mayor densidad (100 kg/m^3). Mayor información del efecto del

cambio en la orientación de la vivienda sobre la eficiencia energética del resto de los aislantes térmicos se muestra en el Anexo IV.

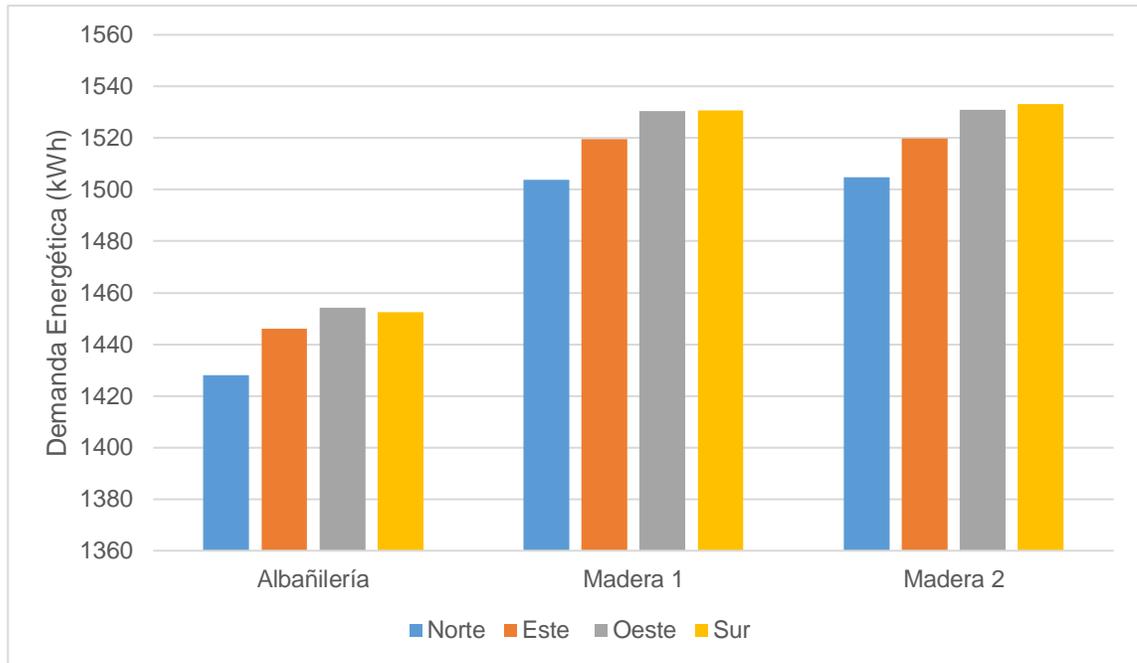


Figure 19: Demanda Energética (kWh/año) por orientación en configuraciones de muro con aislante de corteza de eucalipto 100kg/m³.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados señalan una reducción de hasta 26 kWh/año en el caso de la tipología de albañilería al realizar cambios en su orientación, mientras que en las configuraciones de madera se alcanza una variación de hasta 29 kWh/año.

Donde, además es posible resaltar que tal como se mencionó anteriormente, la orientación Sur es la que presenta una mayor demanda energética en comparación a las otras orientaciones, solo siendo algo menor que la orientación Oeste en la tipología albañilería, esto demuestra que los resultados señalados anteriormente por tipología y aislación son aquellos que mantienen el peor desempeño térmico y por tanto señalan la mayor demanda energética que pudiese necesitar la vivienda.

Por otra parte, la orientación Norte es quien demuestra un mejor desempeño térmico, lo cual otorgaría a la vivienda una disminución notable de la demanda energética al establecer una ubicación de las entradas de luz en esa orientación.

Cambio Zona Climática, resultado eficiencia energética

El cambio de zona climática fue otra manera de demostrar si existe variación en la demanda energética de la vivienda. En este caso, se determinaron para cada aislante térmico y configuración de muro como la eficiencia energética varía con la zona térmica como se muestran en el Anexo V. Se compararon dos zonas térmicas Concepción (zona térmica 4) y Santiago de Chile (zona térmica 3).

La figura 20, muestra la demanda energética para el aislante de eucalipto de densidad de 100 kg/m^3 , para cuando cambia la zona térmica desde Concepción a Santiago de Chile.

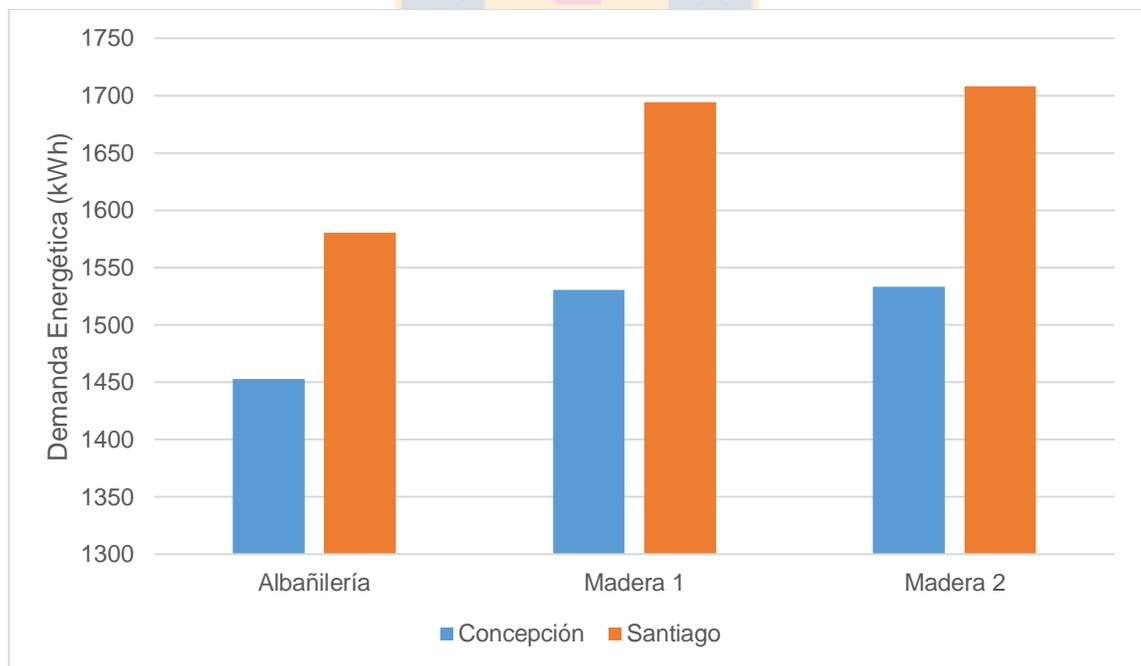


Figura 20: Demanda Energética (kWh/año) por zona térmica en configuraciones de muro con aislante de corteza de eucalipto 100 kg/m^3 .

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 20 se demuestra que al realizar un cambio de la zona climática en la cual se encontraría ubicada la vivienda se generan grandes variaciones en cuanto a la demanda energética anual, de donde es posible señalar el incremento de la demanda en todas las tipologías de entre 128 – 174 kWh/año dependiendo de la tipología y configuración escogida, lo que equivale a entre un 8 y un 11 % de mayor necesidad de energía por concepto de calefacción.

Por otra parte, como es posible ver en el Anexo II, todas las configuraciones de muro utilizadas se encuentran con valores de transmitancia y resistencia térmica aceptadas en la zona térmica número 4 (Concepción y, de igual forma sería posible su utilización en la zona térmica 3 Santiago), ya que éste presenta valores de transmitancia necesarias más altas, como señala la tabla 2.

Teniendo en cuenta la puesta en vigencia de una nueva normativa en cuanto a reglamentación térmica en viviendas para las comunas de concepción metropolitano por parte del plan de prevención y descontaminación atmosférica, se entiende que a medida que avance el tiempo se hará un hincapié en utilizar mejores soluciones constructivas como a su vez de aislante que demuestren mejores resultados en la reducción de la demanda energética en el sector residencial. Los resultados obtenidos exponen una muestra que los aislantes en base a fibras naturales de corteza de eucalipto son competitivos con los aislantes convencionales de uso actual, señalando mejores resultados que estos en todos los escenarios simulados.

5. CONCLUSIONES

La simulación energética usando el software Design Builder permitió determinar desde etapas iniciales, es decir, etapa piloto de producción y prueba de aislante térmico de eucalipto la demanda de energía para su futura implementación en vivienda sociales, usando diferentes tipologías de muros. Esta información constituye un aporte en la toma de decisiones en el sector de la construcción en Chile, generando mejores alternativas de edificación que disminuyan los gastos energéticos de las viviendas.

Los resultados de la simulación energética demuestran una mejoría sustancial en el consumo energético de la vivienda al hacer uso del aislante de corteza de eucalipto, en cualquiera de la tipologías y configuraciones de muro establecidas. De donde es posible señalar una disminución de la demanda energética que varía según el espesor del aislante C. Eucalipto entre 19,67 y 26,99 % en la tipología albañilería vs poliestireno exp y de entre 14,86 – 22,42% en la misma tipología vs poliuretano exp. A su vez en la tipología de madera se produce una reducción menor en comparación con el aislante de lana mineral, arrojando una reducción de 2,74 – 13,55%, mientras que la mayor reducción se encuentra al hacer una comparación con el aislante de poliestireno expandido en tipología de madera, donde los valores demuestran una disminución de la demanda de entre 22,89 y 33,01%.

Indistintamente de la configuración de muro donde se implementen las diferentes alternativas de aislante de corteza de eucalipto, el panel con mayor densidad (100kg/m^3) manifestó las menores demandas energéticas de la vivienda. La demanda energética mostró una reducción para cuando se incrementan las densidades del aislante de eucalipto.

Los parámetros de orientación de la vivienda y las características climáticas de las zonas térmicas son factores claves en la demanda energética de la vivienda

social. En este caso se demostró, que la orientación de la vivienda más factible energéticamente para Concepción es la orientación Norte, reportándose una reducción de entre 1,68 - 1,85% con respecto a la orientación Sur. Mientras tanto, la implementación del aislante de eucalipto en zona térmica 3, la cual corresponde a Santiago de Chile mostró mayores demandas energéticas en comparación con la zona térmica 4 (Concepción) en cualquiera de las configuraciones de muro.

Si bien, se realizó un estudio del aislante de fibras naturales de corteza de eucalipto, el cual señala las capacidades térmicas de este y su similitud con aquellos de origen sintético, este no es determinante en cuanto a los niveles de reducción de la demanda energética en una vivienda y, por ende, de las emisiones consideradas en el uso de una vivienda, así como también no se ha considerado el desempeño de este aislante una vez integrado a la configuración de un muro tal como lo establece la normativa de edificaciones residenciales en el país en el listado de soluciones constructivas. De manera que el aislante solo ha sido considerado de manera puntual y no en conjunto con las demás partes que conforman una vivienda. Por tanto, es esencial el realizar un balance energético de la vivienda utilizando este aislante no convencional para visualizar lo favorable de su utilización en la construcción de viviendas en la zona, dando énfasis en la variación de la demanda de energía por concepto de calefacción y por tanto el alcance en términos de impactos ambientales que generaría en la etapa de uso en la vivienda.

Algunas recomendaciones de estudios posteriores a esta investigación en base a los resultados obtenidos que ayudarían a dimensionar de mejor manera las aptitudes y ventajas ambientales del aislante en estudio son:

- Utilizar los datos de demanda energética encontrados y realizar un análisis de ciclo de vida del periodo de uso del aislante de corteza de eucalipto en

muros de viviendas sociales, para así determinar los impactos ambientales asociados.

- Determinar la cantidad de aislantes de corteza de eucalipto necesario por vivienda y realizar un catastro de cuantas viviendas pudiese cubrir la materia prima disponible anualmente en la región del Biobío.
- Realizar un análisis de la demanda energética del aislante de Corteza de eucalipto en viviendas ubicadas en el extremo sur de Chile, para así determinar si cumple sus mayores exigencias térmicas.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aditya, L., Mahlia, T.M.I., Rismanchi, B., Ng, H.M., Hasan, M.H., Metselaar, H.S.C., Muraza, O., Aditya, H.B., (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73, 1352–1365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>

Álvarado, R.G., González, A., (2014). Condiciones de forma y desempeño energético de viviendas unifamiliares Form conditions and energy performance of single-family housing in Resumen. *Rev. INVI* 28, 111–141.

ANUARIO FORESTAL 2015. INSTITUTO FORESTAL EL SECTOR FORESTAL CHILENO (2015).

ANUARIO FORESTAL 2019. INSTITUTO FORESTAL EL SECTOR FORESTAL CHILENO (2019).

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. *Build. Environ.* 114, 307–332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>

BUSTAMANTE, W. Guía de Diseño para la eficiencia energética de la vivienda Social. Santiago: Ministerio de Vivienda y Urbanismo, (2009).

Casas-Ledón, Y., Daza Salgado, K., Cea, J., Arteaga-Pérez, L. E., & Fuentealba, C. (2020). Life cycle assessment of innovative insulation panels based on eucalyptus bark fibers. *Journal of Cleaner Production*, 249(xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119356>

CA Agostini, MC Plottier, EH Saavedra, La demanda residencial de energía eléctrica en Chile, *Econ. Chilena* 15 (3) (2012) 64–83. <https://si2.bcentral.cl/public/pdf/revistaeconomia/2012/dic/recv15n3dic2012pp64-83.pdf>

Damico, F.C., Alvarado, R.G., Kelly, M.T., Oyola, O.E., Oyola, O.E., Diaz, M., (2012). Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile. *Arquiteturarevista* 8, 62–75. <https://doi.org/10.4013/arg.2012.81.07>

Daza Salgado, K. (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. Universidad de Concepción. Facultad

de Ciencias Ambientales. Recuperado a partir de <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/402>

de Dear, R., & Brager, G. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. UC Berkeley: Center for the Built Environment. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/4qg2p9c6>

Diego A. Vasco, Manuel Muñoz-Mejías, Rodrigo Pino-Sepúlveda, Roberto Ortega-Aguilera, Claudio García-Herrera, (2016). Thermal simulation of a social dwelling in Chile: Effect of the thermal zone and the temperature-dependant thermophysical properties of light envelope materials, Applied Thermal Engineering, Volume 112, 2017, Pages 771-783, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.130>.

Escorcía, O., García, R., Trebilcock, M., Celis, F., Bruscato, U., (2012). Mejoramientos de envolvente para la eficiencia energética de viviendas en el centro-sur de Chile. Inf. la Construcción 64, 563–574. <https://doi.org/10.3989/ic.11.143>

F. Aldawi, F. Alam, I. Khan, M. Alghamdi, Efecto de los climas y materiales de construcción en el rendimiento térmico de las paredes de la casa, Proc. Ing. 56 (2013) 661–666, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.175>

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.

García-Alvarado, R., González, A., Bustamante, W., Bobadilla, A., Muñoz, C. (2014). Características relevantes de la simulación energética de viviendas unifamiliares. Informes de la Construcción, 66(533): e005, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.108>.

González Caceres, Alex. (2012). Evaluación de herramientas de simulación energética: estudio del caso de la determinación de la demanda de calefacción en viviendas en concepción. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3174.8969>

Hong, S.H., Gilbertson, J., Oreszczyn, T., Green, G., Ridley, I (2009). A field study of thermal comfort in low-income dwellings in England before and after energy efficient refurbishment. Build. Environ. 44, 1228–1236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.003>

Kamal, A., Al-Ghamdi, S.G., Koc, M., (2019). Revaluating the costs and benefits of energy efficiency: A systematic review. *Energy Res. Soc. Sci.* 54, 68–84. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.03.012>

Martínez, P.W., Kelly, M.T., (2015). Integration of performance criteria in the energy-environmental improvement of existing social housing in Chile. *Ambient. Construido.* 15., 47-63. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000200013>

MINVU, 2006. Manual de aplicación reglamentación térmica. O.G.U.C. Art. 4.1.10 Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

MINVU, 2014. Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

MINVU, 2018. Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, Tomo I: Salud y Bienestar. (2018). División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional - Ditec, Minvu.

MINVU, 2018. Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, Tomo II: Energía. (2018). División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional - Ditec, Minvu.

MMA, 2014. Futuro de la calefacción en Chile: Opciones y Consecuencias.

MMA, 2018. Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitano (D.S. N°6/2018, Ministerio del Medio Ambiente, 2018)

MINVU, 2018. Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, Tomo II: Energía. (2018). División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional - Ditec, Minvu.

Norma Chilena NCh 853-2007 “Acondicionamiento térmico – Envoltura térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas”.

Saavedra, S. V. (2017) Desarrollo de prototipos software para modelación paramétrica y visualización de resultados enmarcados en una plataforma de optimización de diseños de reacondicionamientos energéticos para viviendas. Universidad del Biobío <http://repopib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/3196>

Silvero, F., Rodrigues, F., Montelpare, S., Spacone, E., Varum, H., (2019). The path towards buildings energy efficiency in South American countries. *Sustain. Cities Soc.* 44, 646–665. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.028>

Rocchi, L., Paolotti, L., Fagioli, F.F., Boggia, A., (2018). Production of insulating panel from pruning remains: An economic and environmental analysis. *Energy Procedia* 147, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.044>

Rodríguez, M. V. (2015). Materiales aislantes sostenibles. Universidad De Extremadura Escuela Politécnica, I(I), 1–168. Recuperado a partir de 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

Romero Ramos, N. (2011). Consumo de Energía a Nivel Residencial en Chile y Análisis de Eficiencia Energética en Calefacción. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104235>

Ricciardi, P., Belloni, E., Cotana, F., (2014). Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment. *Appl. Energy* 134, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.112>

Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., Asdrubali, F., (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62, 988–1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>

Sette, C.R., Hansted, A.L.S., Novaes, E., Lima, P.A.F. e., Rodrigues, A.C., Santos, D.R. de S., Yamaji, F.M., (2018). Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. *Ind. Crops Prod.* 122, 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.057>

Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., Gabarrell, X., (2016). Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions. *J. Clean. Prod.* 113, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.090>

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>

Vera, S., Órdenes, M., (2002). Evaluación del desempeño energo-térmico de una vivienda social en Chile, utilizando un programa de simulación energética de edificios. *Rev. Ing. Construcción* 17, 133–142. <https://doi.org/NREL/TP-550-47465>

7. ANEXOS

ANEXO I: Soluciones constructivas seleccionadas para la determinación de las configuraciones de muros.

| | | | | | | | |
|---|---|-------------------|----------|---|-----------------------------------|-----------------|------|
| Código 1.2.G.B.A1.7 | Ladrillo artesanal de 285 x 143 x 58 [mm], cantería 20 mm, estuco exterior y revestimiento interior de yeso cartón (con poliestireno expandido) | | | | | | |
| A. Único valor de Resistencia (Rt) y Transmitancia (U) Térmica para la solución constructiva | | | | | | | |
| RESISTENCIA TÉRMICA (Rt): | 0.66 (m ² *K/ W) | | | TRANSMITANCIA TÉRMICA (U) | 1.51 (W/m ² *K) | | |
| B. En caso que se modifique el espesor del material aislante manteniendo el resto de la configuración constructiva: | | | | | | | |
| | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 | Z6 | Z7 |
| Rt (m ² *K/ W) | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U (W/m ² *K) | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Espesor Aislante (mm) | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Descripción de la Solución Constructiva | | | | Genérico | X | Marca Comercial | ---- |
| <p>Muro de albañilería construido a base de ladrillos artesanales de 285 x 143 x 58 [mm] de espesor, unidos con un mortero arena-cemento que cumple con la norma NCh 2256/1. El espesor promedio de la cantería vertical y horizontal es de 20 mm. Por la cara exterior de este muro va un estuco de arena cemento de 15 mm de espesor. Por la cara interior va adherida una plancha de poliestireno expandido de 10 mm de espesor y densidad 10 kg/m³. Sobre el poliestireno expandido se ha colocado una plancha de yeso cartón de 10 mm de espesor.</p> | | | | | | | |
| Forma de cumplir con las exigencias | | | | Densidad material aislante | Institución | Vigencia | |
| Certificado de ensaye | --- | Cálculo (NCh 853) | X | Poliestireno expandido 10 kg/m ³ | MINVU - IDIEM | NCh 853 | |
| Corte: | | | | Planta | | | |
| | | | | | | | |

Figura 21: Solución constructiva tipología albañilería poliestireno exp.

| | |
|-------------------------------|---|
| Código 1.2.G.B.A1.8 | Ladrillo artesanal de 285 x 143 x 58 [mm], cantería 20 mm, estuco exterior y revestimiento interior de yeso cartón (con poliuretano expandido de 10 mm) |
|-------------------------------|---|

A. Único valor de Resistencia (Rt) y Transmitancia (U) Térmica para la solución constructiva

| | | | |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| RESISTENCIA TÉRMICA (Rt): | 0.79 (m ² *K/ W) | TRANSMITANCIA TÉRMICA (U) | 1.26 (W/m ² *K) |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|

B. En caso que se modifique el espesor del material aislante manteniendo el resto de la configuración constructiva:

| | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 | Z6 | Z7 |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Rt (m ² *K/ W) | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U (W/m ² *K) | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Espesor Aislante (mm) | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

| Descripción de la Solución Constructiva | Genérico | X | Marca Comercial | ---- |
|---|----------|----------|-----------------|------|
|---|----------|----------|-----------------|------|

Muro de albañilería construido a base de ladrillos artesanales de 285 x 143 x 58 [mm] de espesor, unidos con un mortero arena-cemento que cumple con la norma NCh 2256/1. El espesor promedio de la cantería vertical y horizontal es de 20 mm. Por la cara exterior de este muro va un estuco de arena cemento de 15 mm de espesor. Por la cara interior va adherida una plancha de poliuretano expandido de 10 mm de espesor y densidad 25 kg/m³. Sobre el poliuretano expandido se ha colocado una plancha de yeso cartón de 10 mm de espesor.

| Forma de cumplir con las exigencias | | | | Densidad material aislante | Institución | Vigencia |
|-------------------------------------|-----|-------------------|----------|--|---------------|----------|
| Certificado de ensaye | --- | Cálculo (NCh 853) | X | Poliuretano expandido 25 kg/m ³ | MINVU - IDIEM | NCh 853 |

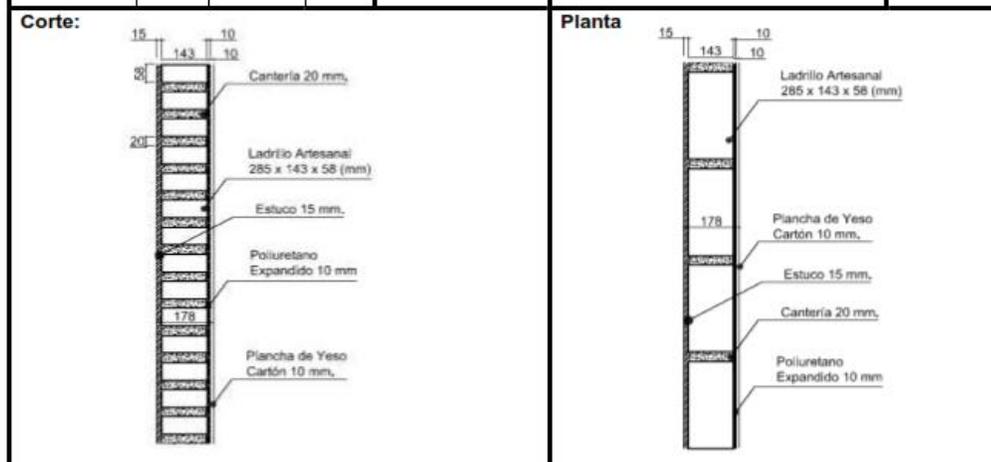


Figura 22: Solución constructiva tipología albañilería poliuretano exp.

| | |
|-------------------------------|--|
| Código 1.2.M.C24.28 | Muro estructurado pino radiata 2x3" exterior fibrocemento de 6mm, interior aislante térmico de poliestireno expandido de 15kg/m ³ en Polyplac ST de Knauf. Sistema WE106 400. |
|-------------------------------|--|

A. Único valor de Resistencia (Rt) y Transmitancia (U) Térmica para la solución constructiva

| | | | |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|
| RESISTENCIA TÉRMICA (Rt): | -- (m ² *K/ W) | TRANSMITANCIA TÉRMICA (U) | -- (W/m ² *K) |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|

B. En caso que se modifique el espesor del material aislante manteniendo el resto de la configuración constructiva:

| | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 | Z6 | Z7 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Rt (m ² *K/ W) | 0,69 | 0,69 | 0,69 | 0,69 | 0,69 | 0,93 | --- |
| U (W/m ² *K) | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 1,06 | --- |
| Espesor Aislante (mm) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | --- |

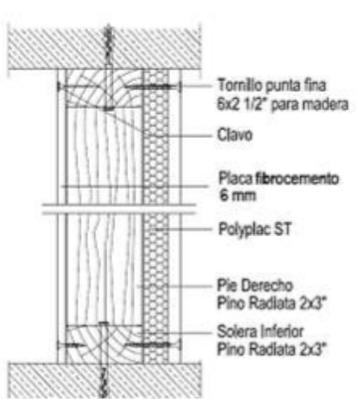
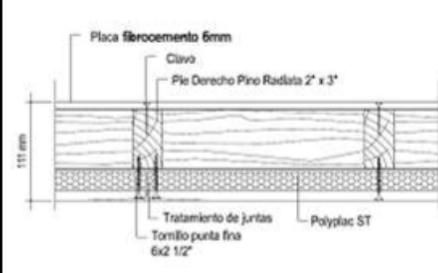
| Descripción de la Solución Constructiva | | | | Genérico | ---- | Marca Comercial | X |
|---|------|-------------------|----------------------------|---|----------------------|-----------------|---------------|
| Solución compuesta por una estructura de entramado vertical de pino radiata 2x3", con pie derechos distanciados entre ejes cada 40cms. Las soleras superior e inferior de pino radiata 2x3" contemplan aplicaciones de banda acústica Knauf de 3mm de espesor y 50mm de ancho. Esta estructura está forrada hacia el exterior por una placa de fibrocemento 6mm de espesor fijada a la estructura mediante tornillos autoavellanantes de punta fina 6x1 1/4" para madera. Por el interior está forrada por Polyplac ST Knauf, formada a partir de una placa de yeso cartón ST 10mm adherida a una plancha de poliestireno expandido de espesor variable según zona térmica y de 15 kg/m ³ de densidad. Polyplac es fijada a través de tornillos 6x2 1/2" punta fina para madera a la estructura de pie derechos. Se considera tratamiento de juntas en Polyplac con masilla y cinta Knauf, también se cubren las cabezas de los tornillos con masilla. | | | | | | | |
| Forma de cumplir con las exigencias | | | Densidad material aislante | Institución | | Vigencia | |
| Certificado de ensaye | ---- | Cálculo (NCh 853) | X | 15 Kg/m ³ | Knauf de Chile Ltda. | | Junio de 2014 |
| Corte:  | | | | Detalle (opcional)  | | | |

Figura 23: Solución constructiva tipología madera poliestireno exp.

| | |
|-------------------------------|--|
| Código 1.2.M.C24.30 | Muro tabique perimetral estructura de madera pino radiata 2x3", exterior Malla Tabique Jaenson, aislante térmico lana mineral, interior yeso cartón de 15mm. |
|-------------------------------|--|

A. Único valor de Resistencia (Rt) y Transmitancia (U) Térmica para la solución constructiva

| | | | |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| RESISTENCIA TERMICA (Rt): | ---- (m ² *K/ W) | TRANSMITANCIA TERMICA (U) | ---- (W/m ² *K) |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|

B. En caso que se modifique el espesor del material aislante manteniendo el resto de la configuración constructiva:

| | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 | Z6 | Z7 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Rt (m ² *K/ W) | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 1,74 |
| U (W/m ² *K) | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,58 |
| Espesor Aislante (mm) | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 65 |

| Descripción de la Solución Constructiva | Genérico | ---- | Marca Comercial | X |
|---|----------|------|-----------------|---|
|---|----------|------|-----------------|---|

Muro tabique perimetral conformado por montantes de pino radiata 2x3", distanciados entre ejes a máximo 40cm y de dos soleras (superior e inferior) de pino radiata 2x3". Esta estructura está forrada por una de sus caras con plancha de yeso cartón "Gyplac" estándar de 15mm. La otra cara está revestida con malla tabique Jaenson, composición de fieltro de alta calidad, papel Kraft y malla de acero galvanizado, en ella se aplica mortero tradicional de estuco 1:3 de 25mm de espesor armado con la misma, con adición de fibra de polipropileno en relación 100gr por saco de cemento o 600gr por m³ de mezcla. El espacio libre al interior del panel es relleno con una colchoneta de lana mineral "Romeral" de densidad 40kg/m³ y espesor variable según zona térmica, que en conjunto con la cámara de aire responden a la sollicitación térmica.

Nota: Entre la estructura soportante y el forro que se fija por el lado interior debe ir colocada una barrera de vapor (por ejemplo, láminas de polietileno de 0,05 ó 0,10mm de espesor).

| Forma de cumplir con las exigencias | | | Densidad material aislante | Institución | Vigencia | |
|-------------------------------------|------|-------------------|----------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|
| Certificado de ensaye | ---- | Cálculo (NCh 853) | X | 40kg/m ³ | Andes Construction Chile S.A. | NCh 853 |

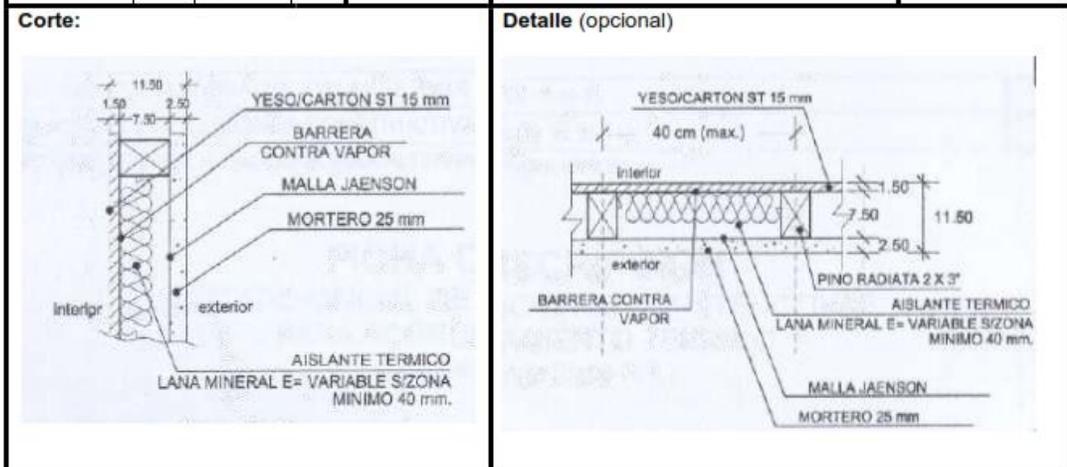
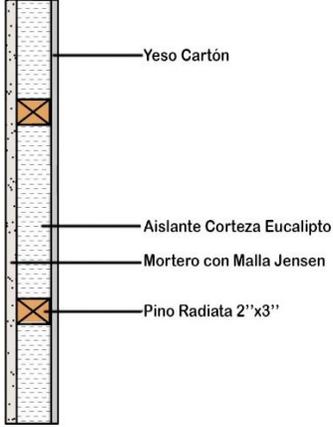


Figura 24: Solución constructiva tipología albañilería poliestireno exp.

ANEXO II: Transmitancias y resistencias térmicas de tipologías y configuraciones seleccionadas

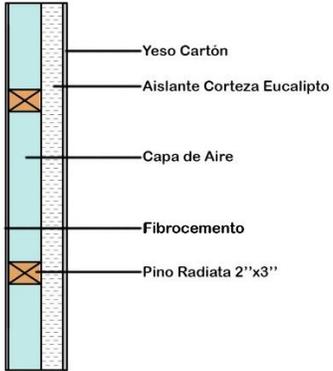
Tabla 12: Transmitancia y resistencia térmica de muros Tipología Madera con Lana Mineral.

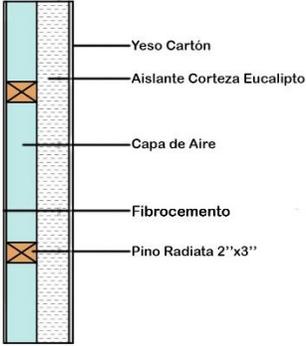
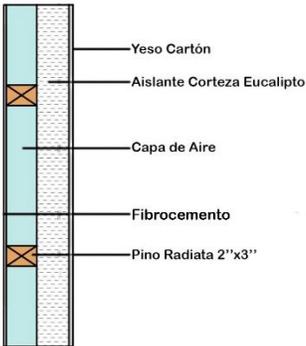
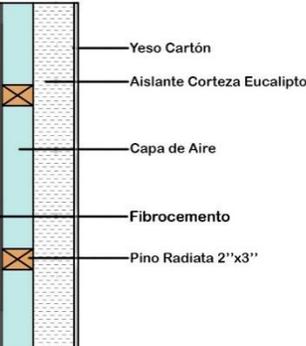
| Tipología Madera – Configuración 1 (Lana Mineral) | | | |
|---|--|--|--------------------------------------|
| Aislante | Configuración Muro | Transmitancia térmica muro (W/m²K) | Resistencia térmica R100 muro |
| Aislante eucalipto 50mm | <p>Yeso Cartón</p> <p>Capa de Aire</p> <p>Aislante Corteza Eucalipto</p> <p>Mortero con Malla Jensen</p> <p>Pino Radiata 2''x3''</p> | 0.626 | 159.7 |
| Aislante eucalipto 80mm Densidad 50 Kg/m³ | <p>Yeso Cartón</p> <p>Aislante Corteza Eucalipto</p> <p>Mortero con Malla Jensen</p> <p>Pino Radiata 2''x3''</p> | 0.504 | 198.5 |

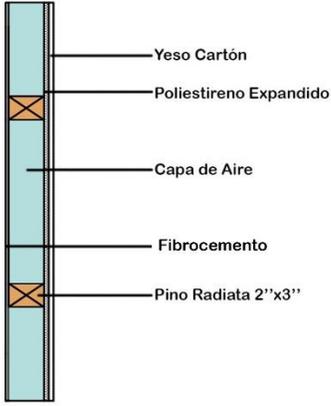
| | | | |
|--|---|--------------|--------------|
| <p>Aislante eucaliptus 80mm Densidad 75 Kg/m3</p> |  | <p>0.523</p> | <p>191.3</p> |
|--|---|--------------|--------------|

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 13: Transmitancia y resistencia térmica de muros Tipología Madera con Poliéstireno.

| <p>Tipología Madera – Configuración 2 (Poliéstireno Expandido)</p> | | | |
|---|---|--|---|
| <p>Aislante</p> | <p>Configuración Muro</p> | <p>Transmitancia térmica muro (W/m2K)</p> | <p>Resistencia térmica R100 muro</p> |
| <p>Aislante eucaliptus 50mm</p> |  | <p>0.631</p> | <p>158.6</p> |

| | | | |
|---|---|--------------|--------------|
| <p>Aislante eucaliptus 80mm Densidad 50 Kg/m3</p> |  | <p>0.456</p> | <p>221.4</p> |
| <p>Aislante eucaliptus 80mm Densidad 75 Kg/m3</p> |  | <p>0.467</p> | <p>214.1</p> |
| <p>Aislante eucaliptus 100mm</p> |  | <p>0.398</p> | <p>251.5</p> |

| | | | |
|--|--|--------------|-------------|
| <p>Poliestireno Expandido</p> |  <p>Yeso Cartón</p> <p>Poliestireno Expandido</p> <p>Capa de Aire</p> <p>Fibrocemento</p> <p>Pino Radiata 2''x3''</p> | <p>1.396</p> | <p>71.7</p> |
|--|--|--------------|-------------|

Fuente: Elaboración Propia.



Anexo III: Proyección de la demanda energética en nuevas normativas constructivas.

Si bien actualmente solo existe una normativa establecida para los parámetros de transmitancia y resistencia térmica de la envolvente térmica (Artículo 4.1.10 de la OGUC), se ha postulado a través del estudio de Estándares de Construcción Sustentable dirigido por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, la instauración de un límite máximo de demanda energética para las viviendas que debe ir en disminución con el paso de los años, a fin de lograr un requerimiento máximo de demanda energética por concepto de calefacción de 30 kWh/m² año para el año 2050, tal como se señala en la Tabla 14 Donde es con los valores establecidos para la zona térmica E, en la que se ubicaría la ciudad de Concepción y, en la que se realizaría una comparación de los resultados obtenidos

Tabla 14: Requerimientos máximos a futuro de demanda en calefacción para vivienda por zona.

| Zonas Térmicas | DEMANDA DE CALEFACCIÓN (kWh/m²año) | | | |
|-----------------------|--|------|------|------|
| | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Zona A | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Zona B | 90 | 65 | 43 | 15 |
| Zona C | 77 | 56 | 38 | 15 |
| Zona D | 71 | 52 | 35 | 15 |
| Zona E | 117 | 88 | 59 | 30 |
| Zona F | 135 | 100 | 67 | 30 |
| Zona G | 120 | 90 | 60 | 30 |
| Zona H | 120 | 90 | 60 | 30 |
| Zona I | 150 | 110 | 73 | 30 |

Fuente: Estándares de Construcción Sustentable para viviendas, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2018.

ANEXO IV: Demandas energéticas con cambios de orientación por tipología y configuración de muro.

Tabla 15: Demanda energética anual y por m² de vivienda de albañilería con orientación Este.

| Tipología Albañilería Orientación Este - Demanda Energética kWh/m² año | | | | | | |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Poliestireno | Poliuretano |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 10mm | 10mm |
| Densidad | 25 Kg/m³ | 50 Kg/m³ | 75 Kg/m³ | 100 Kg/m³ | 10 Kg/m³ | 25 Kg/m³ |
| Mes | | | | | | |
| Abril | 134,47 | 125,39 | 124,15 | 118,70 | 167,43 | 157,45 |
| Mayo | 249,37 | 233,38 | 233,52 | 226,28 | 314,85 | 295,55 |
| Junio | 318,50 | 298,64 | 299,41 | 291,00 | 401,03 | 376,95 |
| Julio | 350,33 | 328,73 | 329,66 | 320,56 | 440,03 | 413,80 |
| Agosto | 298,04 | 279,15 | 279,33 | 270,78 | 374,95 | 352,39 |
| Septiembre | 242,92 | 227,23 | 226,62 | 218,70 | 304,11 | 286,06 |
| Total (kWh) | 1593,63 | 1492,52 | 1492,69 | 1446,02 | 2002,4 | 1882,20 |
| Área Superficie (m²) | 34,68 | 33,93 | 33,93 | 33,43 | 35,69 | 35,69 |
| kWh/m² Superficie | 45,95 | 43,98 | 43,99 | 43,25 | 56,10 | 52,73 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16: Demanda energética anual y por m² de vivienda de albañilería con orientación Norte.

| Tipología Albañilería Orientación Norte - Demanda Energética kWh/m² año | | | | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Poliestireno | Poliuretano |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 10mm | 10mm |
| Densidad | 25 Kg/m³ | 50 Kg/m³ | 75 Kg/m³ | 100 Kg/m³ | 10 Kg/m³ | 25 Kg/m³ |
| Mes | | | | | | |
| Abril | 132,46 | 126,39 | 122,01 | 116,42 | 165,35 | 155,40 |
| Mayo | 246,34 | 233,38 | 230,58 | 223,37 | 310,79 | 291,76 |
| Junio | 314,87 | 298,64 | 295,91 | 287,50 | 396,09 | 372,39 |
| Julio | 346,33 | 328,73 | 325,79 | 316,76 | 434,79 | 408,95 |
| Agosto | 295,00 | 279,15 | 276,24 | 267,65 | 371,19 | 348,85 |
| Septiembre | 241,16 | 227,23 | 224,53 | 216,42 | 302,62 | 284,64 |
| Total (kWh) | 1576,16 | 1493,52 | 1475,06 | 1428,12 | 1980,83 | 1861,99 |
| Área Superficie (m²) | 34,68 | 33,93 | 33,93 | 33,43 | 35,69 | 35,69 |
| kWh/m² Superficie | 45,45 | 44,02 | 43,47 | 42,72 | 55,50 | 52,17 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17: Demanda energética anual y por m² de vivienda de albañilería con orientación Oeste.

| Tipología Albañilería Orientación Oeste - Demanda Energética kWh/m ² año | | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Poliestireno | Poliuretano |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 10mm | 10mm |
| Densidad | 25 Kg/m ³ | 50 Kg/m ³ | 75 Kg/m ³ | 100 Kg/m ³ | 10 Kg/m ³ | 25 Kg/m ³ |
| Mes | | | | | | |
| Abril | 135,62 | 126,61 | 125,36 | 119,95 | 168,48 | 158,51 |
| Mayo | 250,31 | 234,53 | 234,67 | 227,65 | 315,33 | 296,08 |
| Junio | 319,35 | 299,71 | 300,49 | 292,25 | 401,37 | 377,41 |
| Julio | 351,36 | 330,06 | 330,97 | 322,05 | 440,39 | 414,30 |
| Agosto | 299,21 | 280,48 | 280,66 | 272,24 | 375,61 | 353,13 |
| Septiembre | 244,27 | 228,61 | 227,97 | 220,09 | 305,36 | 287,26 |
| Total (kWh) | 1600,12 | 1500,00 | 1500,12 | 1454,23 | 2006,54 | 1886,69 |
| Área Superficie (m²) | 34,68 | 33,93 | 33,93 | 33,43 | 35,69 | 35,69 |
| kWh/m² Superficie | 46,14 | 44,21 | 44,21 | 43,50 | 56,22 | 52,86 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de lana mineral y orientación Este.

| Tipología Madera Lana Mineral Este - Demanda Energética kWh/m ² año | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Lana Mineral |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 40mm |
| Densidad | 25 Kg/m ³ | 50 Kg/m ³ | 75 Kg/m ³ | 100 Kg/m ³ | 40 Kg/m ³ |
| Mes | | | | | |
| Abril | 157,59 | 144,81 | 143,52 | 131,02 | 163,86 |
| Mayo | 266,19 | 250,17 | 250,01 | 236,25 | 274,21 |
| Junio | 334,63 | 316,68 | 317,14 | 302,33 | 343,36 |
| Julio | 367,59 | 348,28 | 348,80 | 333,04 | 376,83 |
| Agosto | 317,93 | 299,56 | 299,39 | 283,49 | 326,74 |
| Septiembre | 267,20 | 250,07 | 249,29 | 233,41 | 275,18 |
| Total (kWh) | 1711,13 | 1609,57 | 1608,15 | 1519,54 | 1760,18 |
| Área Superficie (m²) | 37,02 | 36,25 | 36,25 | 35,73 | 37,28 |
| kWh/m² Superficie | 46,22 | 44,40 | 44,36 | 42,53 | 47,21 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de lana mineral y orientación Norte.

| Tipología Madera Lana Mineral Norte - Demanda Energética kWh/m² año | | | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Lana Mineral |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 40mm |
| Densidad | 25 Kg/m³ | 50 Kg/m³ | 75 Kg/m³ | 100 Kg/m³ | 40 Kg/m³ |
| Mes | | | | | |
| Abril | 155,68 | 142,89 | 141,61 | 129,06 | 161,93 |
| Mayo | 263,90 | 247,86 | 247,64 | 233,80 | 271,90 |
| Junio | 331,87 | 314,01 | 314,33 | 299,27 | 340,56 |
| Julio | 364,49 | 345,18 | 345,61 | 329,66 | 373,70 |
| Agosto | 315,35 | 296,93 | 296,74 | 280,72 | 324,13 |
| Septiembre | 265,35 | 248,17 | 247,32 | 231,37 | 273,36 |
| Total (kWh) | 1696,64 | 1595,04 | 1593,25 | 1503,88 | 1745,58 |
| Área Superficie (m²) | 37,02 | 36,25 | 36,25 | 35,73 | 37,28 |
| kWh/m² Superficie | 45,83 | 44,00 | 43,95 | 42,09 | 46,82 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de lana mineral y orientación Oeste.

| Tipología Madera Lana Mineral Oeste - Demanda Energética kWh/m² año | | | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Lana Mineral |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 40mm |
| Densidad | 25 Kg/m³ | 50 Kg/m³ | 75 Kg/m³ | 100 Kg/m³ | 40 Kg/m³ |
| Mes | | | | | |
| Abril | 159,15 | 146,46 | 145,18 | 132,76 | 165,36 |
| Mayo | 267,70 | 251,79 | 251,62 | 237,95 | 275,67 |
| Junio | 336,08 | 318,20 | 318,63 | 303,92 | 344,75 |
| Julio | 369,37 | 350,18 | 350,66 | 334,95 | 378,53 |
| Agosto | 319,53 | 301,32 | 301,21 | 285,43 | 328,31 |
| Septiembre | 268,90 | 251,95 | 251,15 | 235,32 | 276,74 |
| Total (kWh) | 1720,73 | 1619,90 | 1618,45 | 1530,33 | 1769,36 |
| Área Superficie (m²) | 37,02 | 36,25 | 36,25 | 35,73 | 37,28 |
| kWh/m² Superficie | 46,48 | 44,69 | 44,65 | 42,83 | 47,46 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de poliestireno expandido y orientación Este.

| Tipología Madera Poliestireno Este - Demanda Energética kWh/m² año | | | | | |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Poliestireno |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 10mm |
| Densidad | 25 Kg/m³ | 50 Kg/m³ | 75 Kg/m³ | 100 Kg/m³ | 15 Kg/m³ |
| Mes | | | | | |
| Abril | 165,47 | 147,57 | 146,19 | 134,30 | 227,19 |

| | | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Mayo | 273,11 | 249,94 | 249,57 | 236,90 | 356,69 |
| Junio | 340,34 | 314,00 | 314,14 | 300,63 | 436,39 |
| Julio | 373,57 | 345,09 | 345,24 | 330,80 | 477,51 |
| Agosto | 324,87 | 298,14 | 297,66 | 282,95 | 421,24 |
| Septiembre | 274,51 | 250,10 | 249,07 | 234,24 | 360,95 |
| Total (kWh) | 1751,87 | 1604,84 | 1601,87 | 1519,82 | 2279,97 |
| Área Superficie (m2) | 36,60 | 35,84 | 35,84 | 35,33 | 37,64 |
| kWh/m2 Superficie | 47,86 | 44,78 | 44,69 | 43,02 | 60,57 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de poliestireno expandido y orientación Norte.

| Tipología Madera Poliestireno Norte - Demanda Energética kWh/m2 año | | | | | |
|--|--------------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Poliestireno |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 10mm |
| Densidad | 25 Kg/m3 | 50 Kg/m3 | 75 Kg/m3 | 100 Kg/m3 | 15 Kg/m3 |
| Mes | | | | | |
| Abril | 163,45 | 145,54 | 144,17 | 132,25 | 225,28 |
| Mayo | 270,90 | 247,77 | 247,35 | 234,59 | 354,37 |
| Junio | 337,70 | 311,37 | 311,46 | 297,78 | 433,75 |
| Julio | 370,69 | 342,16 | 342,28 | 327,70 | 474,56 |
| Agosto | 322,35 | 295,53 | 295,01 | 280,24 | 418,85 |
| Septiembre | 272,55 | 248,01 | 247,01 | 232,10 | 359,61 |
| Total (kWh) | 1737,64 | 1590,38 | 1587,28 | 1504,66 | 2266,42 |
| Área Superficie (m2) | 36,6 | 35,84 | 35,84 | 35,33 | 37,64 |
| kWh/m2 Superficie | 47,48 | 44,37 | 44,29 | 42,59 | 60,21 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de poliestireno expandido y orientación Oeste.

| Tipología Madera Poliestireno Oeste - Demanda Energética kWh/m2 año | | | | | |
|--|--------------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Poliestireno |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 10mm |
| Densidad | 25 Kg/m3 | 50 Kg/m3 | 75 Kg/m3 | 100 Kg/m3 | 15 Kg/m3 |
| Mes | | | | | |
| Abril | 166,85 | 149,19 | 147,86 | 136,07 | 227,97 |
| Mayo | 274,57 | 251,57 | 251,23 | 238,65 | 357,71 |
| Junio | 341,77 | 315,59 | 315,75 | 302,33 | 437,28 |
| Julio | 375,32 | 347,02 | 347,23 | 332,86 | 478,57 |
| Agosto | 326,47 | 299,87 | 299,43 | 284,90 | 422,24 |
| Septiembre | 275,85 | 251,83 | 250,93 | 236,20 | 361,59 |
| Total (kWh) | 1760,83 | 1615,07 | 1612,43 | 1531,01 | 2285,36 |

| | | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Área Superficie (m2) | 36,6 | 35,84 | 35,84 | 35,33 | 37,64 |
| kWh/m2 Superficie | 48,11 | 45,06 | 44,99 | 43,33 | 60,72 |

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO V: Demandas energéticas con cambio de zona térmica por tipología y configuración de muro.

Tabla 24: Demanda energética anual y por m² de vivienda de albañilería en zona térmica 3 (Santiago).

| Tipología Albañilería Santiago - Demanda Energética kWh/m2 año | | | | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | | Poliestireno | Poliuretano |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 10mm | 10mm |
| Densidad | 25 Kg/m3 | 50 Kg/m3 | 75 Kg/m3 | 100 Kg/m3 | 10 Kg/m3 | 25 Kg/m3 |
| Mes | | | | | | |
| Abril | 130,53 | 123,54 | 121,67 | 116,61 | 153,18 | 146,04 |
| Mayo | 281,38 | 265,88 | 264,93 | 257,00 | 340,42 | 322,86 |
| Junio | 341,53 | 322,66 | 322,67 | 314,23 | 415,05 | 393,73 |
| Julio | 422,96 | 399,07 | 399,63 | 389,36 | 518,60 | 490,92 |
| Agosto | 341,15 | 322,12 | 321,51 | 312,31 | 414,49 | 392,92 |
| Septiembre | 212,59 | 199,96 | 198,47 | 191,14 | 258,18 | 244,54 |
| Total (kWh) | 1730,14 | 1633,23 | 1628,88 | 1580,65 | 2099,92 | 1991,01 |
| Área Superficie (m2) | 34,68 | 33,93 | 33,93 | 33,43 | 35,69 | 35,69 |
| kWh/m2 Superficie | 49,89 | 48,13 | 48,01 | 47,28 | 58,84 | 55,79 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de lana mineral en zona térmica 3 (Santiago).

| Tipología Madera Lana Mineral Santiago - Demanda Energética kWh/m2 año | | | | | |
|--|-------------------|----------|----------|--------------|----------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | Lana Mineral | |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 40mm |
| Densidad | 25 Kg/m3 | 50 Kg/m3 | 75 Kg/m3 | 100 Kg/m3 | 40 Kg/m3 |
| Mes | | | | | |
| Abril | 164,12 | 150,46 | 148,22 | 134,05 | 170,16 |
| Mayo | 317,31 | 297,39 | 295,82 | 277,11 | 326,17 |
| Junio | 373,30 | 351,69 | 350,51 | 331,39 | 382,80 |
| Julio | 453,80 | 429,56 | 429,10 | 408,29 | 464,50 |
| Agosto | 377,77 | 355,36 | 353,87 | 333,17 | 387,51 |
| Septiembre | 246,82 | 229,49 | 227,68 | 210,33 | 254,51 |
| Total (kWh) | 1933,12 | 1813,95 | 1805,20 | 1694,34 | 1985,65 |

| | | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Área Superficie (m2) | 37,02 | 36,25 | 36,25 | 35,73 | 37,28 |
| kWh/m2 Superficie | 52,22 | 50,04 | 49,80 | 47,42 | 53,26 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26: Demanda energética anual y por m² de vivienda de madera con configuración de muro de poliestireno expandido en zona térmica 3 (Santiago).

| Tipología Madera Poliestireno Santiago - Demanda Energética kWh/m2 año | | | | | |
|---|--------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| Aislante | Corteza Eucalipto | | | Poliestireno | |
| Espesor | 50mm | 80mm | 80mm | 100mm | 10mm |
| Densidad | 25 Kg/m3 | 50 Kg/m3 | 75 Kg/m3 | 100 Kg/m3 | 15 Kg/m3 |
| Mes | | | | | |
| Abril | 174,86 | 155,37 | 153,19 | 139,13 | 238,22 |
| Mayo | 328,74 | 299,44 | 297,74 | 279,60 | 428,44 |
| Junio | 385,90 | 353,13 | 351,70 | 332,99 | 496,81 |
| Julio | 464,77 | 428,38 | 427,63 | 407,75 | 591,32 |
| Agosto | 389,49 | 356,29 | 354,67 | 334,74 | 503,72 |
| Septiembre | 256,64 | 231,95 | 230,20 | 213,66 | 340,94 |
| Total (kWh) | 2000,40 | 1824,56 | 1815,13 | 1707,87 | 2599,45 |
| Área Superficie (m2) | 36,6 | 35,84 | 35,84 | 35,33 | 37,64 |
| kWh/m2 Superficie | 54,66 | 50,91 | 50,64 | 48,34 | 69,06 |

Fuente: Elaboración propia.